L'EDILIZIA

Cairoli Fulvio Giuliani

NELL'ANTICHITÀ

Carocci

Architettura

Lo stato di degrado delle architetture archeologiche è giunto
a un punto tale da richiedere interventi di grande impegno
progettuale e operativo. E così il tipo di attenzione portato ai ruderi
si è trasformato: alla tradizionale tendenza descrittivo-filologica
si è affiancata quella per il restauro e il ripristino.
Oggi l'archeologo non può fare il lavoro dell'ingegnere,
né è possibile il contrario. Ma mettere insieme un archeologo
e un ingegnere dà spesso luogo a grosse difficoltà di collaborazione.
Questo libro non pretende di essere né un trattato di archeologia né,
tanto meno, un manuale di edilizia antica. Sottolineando la necessità
di conoscere le strutture antiche profondamente, dall'interno,
cerca piuttosto di stabilire un contatto, un comune linguaggio
che consenta una collaborazione troppo spesso difficile.

Cairoli Fulvio Giuliani è ordinario di Rilievo e analisi tecnica
dei monumenti antichi presso la Facoltà di Lettere
dell'Università di Roma "La Sapienza", e docente
presso la Scuola archeologica italiana di Atene.
Tra le sue pubblicazioni *Tibur I* e *Tibur II*, De Luca, Roma 1966 e 1970,
il manuale *Archeologia: documentazione grafica*, De Luca, Roma 1976,
L'area centrale del Foro Romano, Olschki, Firenze 1987.

Cairoli Fulvio Giuliani

L'edilizia nell'antichità

Carocci editore

Indice

Introduzione

Questi appunti hanno un carattere ibrido, l'uso stesso dei termini risulta talvolta improprio o non perfettamente aderente a quello che ne fanno i tecnici. Questo per stabilire una comunicazione con il lettore di formazione letteraria.

Così pure alcune notazioni, soprattutto sull'uso dei materiali e la confezione delle murature, hanno un sapore arcaico perché i metodi e le tecniche di costruzione antichi, durati fino alla fine del secolo scorso con prolungamenti ancora ai primi del Novecento, successivamente sono stati in gran parte abbandonati.

È stato quindi necessario rifarsi ai manuali di quel periodo che risentono sì della preparazione teorica ma mostrano anche grande pratica del cantiere, dimestichezza con le maestranze e, spesso, preparazione umanistica più incisiva di quanto non si riscontri oggi.

Gli ingegneri della fine dell'Ottocento e dell'inizio del Novecento erano avvantaggiati nello studio dei monumenti antichi proprio perché la cultura tecnica del livello universitario veniva innestata su un ceppo letterario classico di grande solidità, capace di informare in modo determinante il loro essere ingegneri.

L'avvenuta perdita di questo insieme costituisce il nodo della questione.

Faccio un esempio: Rodolfo Lanciani, il fondatore della Topografia di Roma antica secondo la concezione moderna, uno studioso sulla cui statura normalmente non si sollevano se non le facili riserve legate all'epoca in cui si trovò ad agire, era appunto un ingegnere. E dubito che se fosse stato altro avrebbe potuto lasciare una traccia altrettanto profonda.

Si possono fare altri nomi di protagonisti degli studi sull'architettura archeologica: A. Choisy, G.T. Rivoira, G. Giovannoni, G. Cozzo, I. Gismondi, L. Crema, G. De Angelis d'Ossat e tanti altri, tutti tecnici.

C'è stata un'epoca in cui l'archeologia, come l'architettura, non aveva ancora ben delineato il proprio carattere e così attingeva personalità da discipline che oggi sembrano molto diverse, perfino contrastanti, ma che allora non lo erano poi in modo tanto accentuato.

Per questo nel 1882 si potè istituire nella Facoltà di Lettere della Sapienza di Roma, per un ingegnere, la cattedra di Topografia romana. Rodolfo Lanciani la tenne per 45 anni e i risultati della sua attività sono noti a tutti. Ma il vecchio, insuperabile attrito tra le due culture (tecnica

e letteraria) e la sede specifica in cui l'ingegnere si trovò ad agire, sede che per sua natura procacciava allievi più disponibili agli studi umanistici che a quelli tecnici, comportò delle modificazioni.

Il carattere che il Lanciani, attento e sensibile al dato filologico e storico come alla concretezza e agli aspetti strutturali, aveva dato alla disciplina, lentamente si trasformò, potenziando l'asse storico-filologico. Questo scarto nel percorso fu pagato tradendo in qualche modo la globalità dell'approccio.

Tuttavia rimase nell'aria la consapevolezza che non si potesse fare a meno dell'analisi strutturale degli edifici, e che nel frequente conflitto tra la realtà materiale e i suggerimenti delle fonti letterarie «il monumento è quello che vince; il muro, cioè la realtà materiale, si impone alla tradizione scritta» (Lugli, 1933).

Un'affermazione di principio che, all'epoca in cui venne pronunciata, dovette sembrare molto più naturale di quanto non appaia oggi, ma che poi risultò di difficile applicazione pratica.

Infatti, dopo la soppressione dell'asse tecnico, in un contorno culturale differente, non si poteva risalire ai problemi strutturali (cioè a comprendere l'architettura archeologica) senza pagare un contributo, che finì con l'essere sclerotizzante, ai valori di superficie, alla classificazione delle caratteristiche formali delle tecniche edilizie, all'attribuzione a esse di significati cronologici. Si abbatterono steccati di sapore evoluzionistico come quello riguardante l'opera poligonale (I-IV maniera) ma se ne avvalorarono altri, come quello del rapporto cronologico tra l'opera incerta, la "quasi reticolata" e la reticolata.

L'esigenza di mettere ordine nelle "tecniche edilizie" romane fu sentita da molti studiosi (Ashby, Van Deman, Frank), ma soprattutto da G. Lugli e M.E. Blake, tutti del versante letterario. La loro opera è stata e rimane utile per orientarsi nell'intrico della cronologia e delle attribuzioni dei resti murari. Però non basta. E non basta perché quello che doveva essere un primo passo fu anche l'unico. Malauguratamente questo "primo capitolo" è risultato soddisfacente per le tendenze sempre più diffuse alla catalogazione, inventariazione, schedatura, che, in genere, non vanno oltre la pelle del monumento.

Il concetto attuale di tecnica edilizia antica va riconsiderato con spirito critico e sfruttato semmai per il passo ulteriore: identificare i supporti strutturali di cui è esito, così che possa servire alla comprensione delle architetture archeologiche e alla loro ricostruzione.

Limitandone l'uso a strumento di consultazione per la schedatura o anche solo a mezzo di definizione cronologica, se ne immiserisce la dinamicità potenziale, il significato di "primo passo", e la si rende di fatto inutile, quando non dannosa.

Del resto la mole delle informazioni che riguardano l'antico è tale che ne diviene difficilissima quando non impossibile la gestione, e risulta addirittura problematica la distinzione tra informazione corretta e pertinente e quella che non lo è. Questo semplice fatto riduce di per sé l'efficacia dell'uso dell'informatica; l'anello debole della catena è ancora una

volta l'uomo che deve giudicare i dati da immettere nel computer e stabilirne il successivo impiego.

Per quanto riguarda gli edifici sono convinto che ancor prima, molto prima, di confezionare i parametri di una qualunque scheda, si debba agire sulla preparazione dell'archeologo. Cioè, l'archeologo deve passare dal tradizionale rassicurante approccio descrittivo, fondato sull'illusione dell'oggettività della descrizione della struttura, a quello incerto e dubitativo della comprensione. Senza questo passaggio le banche dati e le informazioni più minuziose saranno inutili, se non dannose.

Una struttura, in quanto unità quadridimensionale, non può conoscersi attraverso l'accostamento paratattico di dati che riguardano la sola bidimensionalità.

Con questo non intendo dire che la schedatura sia inutile, tutt'altro, essa è la sistematizzazione, finalmente generalizzata e codificata del vecchio modo di considerare le costruzioni antiche, per singole, minute sezioni dermatiche, modo utilissimo alla individuazione di una campionatura delle superfici murarie.

Quanto poi tutto questo possa servire alla conoscenza di un edificio e della sua storia, è questione diversa.

E a me interessa quest'ultimo fatto: l'incidenza che i lavori edilizi ebbero nel mondo antico sia dal punto di vista economico sia da quello organizzativo.

Suetonio (*Claud.*, XX) parla di 30.000 uomini impiegati per undici anni da Claudio nella realizzazione dell'emissario del Fucino, ed evidentemente nelle opere connesse.

Se la cifra è vera, e l'estensione dell'area dei lavori la rende possibile, e se con essa si individuano solo gli operai attivi sul campo, la cifra dovrebbe essere moltiplicata per 5 considerando l'indotto ma escludendo la sussistenza (Hopkins, 1978, p. 15). Si avrebbero così 150.000 uomini.

Applicando lo stesso procedimento per le altre imprese edilizie pubbliche del regno di Claudio (si pensi solo al porto ostiense, agli acquedotti dell'*Anio Novus*, della Claudia ecc; si tralasciano ovviamente perché incontrollabili quelle private), è facile immaginare che da Ostia ad Alba Fucente, a una stima approssimata, nell'arco di tredici anni, dovrebbero aver lavorato 1.500.000 uomini, gran parte contemporaneamente data la grandezza delle imprese, e questo senza contare i lavoratori addetti alle vettovaglie, al vestiario, le donne ecc.

Non è difficile sollevare dubbi sul profilo ricostruttivo: o la cifra data da Suetonio è esagerata o comprende anche l'indotto. In tal caso, ridividendo per 5, si avrebbe la cifra più ragionevole di 300.000 "opere" destinate, durante il regno di Claudio, all'edilizia nell'area tra Ostia e il Fucino, Roma compresa.

Il problema è certo interessante ma quali elementi abbiamo per stabilire un nesso tra le notizie delle fonti e la ricostruzione storica? Come ha recentemente messo in luce J.E. Skydsgaard (1983, p. 223) il solo mezzo è l'analisi tecnica e strutturale dei monumenti, al di fuori di questo non

è possibile la comprensione del peso economico che ebbe l'edilizia nella storia.

Lo stato di degrado delle architetture archeologiche è giunto a un punto tale da richiedere interventi di grande impegno progettuale e operativo. E così il tipo di attenzione portato ai ruderi si è trasformato: alla tradizionale tendenza descrittivo-filologica si è affiancata quella per il restauro e il ripristino, meno frequentemente per il consolidamento.

Da tutto questo deriva lo strabismo fra i tempi di conoscenza (rilevamenti, letture analitiche, strutturali, funzionali, filologiche, storiche ecc.) e quelli di esecuzione dei restauri, normalmente assai più rapidi. Così, se da un lato con troppa frequenza i restauri vengono fatti "prima" dello studio, dall'altro è anche vero che la lentezza del processo conoscitivo porterebbe in molti casi a non avere più il soggetto da restaurare per intervenuto crollo.

Diciamo subito che la grande attività descrittivo-filologica che distingue i nostri tempi non può creare gravi problemi se non teorici: che essa sia corretta o no, utilizzabile o no, significativa o no, realistica o fantasiosa, è un fatto che riguarda la coscienza di ognuno, ma non ha potere di incidere più che tanto sul futuro del monumento.

Diversamente gli interventi diretti (tanto lo scavo come il restauro), che lasciano comunque il segno, hanno bisogno di una condizione che la prima categoria di interessi può permettersi di non avere: la serietà di preparazione. Si potrebbe anche sostenere, però, che questo è un problema più per i tecnici che per gli archeologi, i quali dunque possono continuare con tranquillità a disquisire di attribuzionismi, e a proporre ricostruzioni.

Ma non è così semplice. Agli edifici antichi è toccata la sciagurata sorte di non trovare nell'organizzazione degli studi moderni una competenza che faccia per loro. Nei diversi interventi, infatti, si risente di volta in volta questa equivocità di *status*: ora prende il sopravvento il lato archeologico (scavo) ora quello tecnico (restauro), ora entrambi lottano senza gran senso, ora regna l'abbandono totale.

Una cosa è però certa, oggi l'archeologo non può fare il lavoro dell'ingegnere e dell'architetto, né è possibile il contrario: servono entrambi. Ma mettere insieme un archeologo e un ingegnere dà luogo a grosse difficoltà di collaborazione: i metodi sono diversi, così come i modi di affrontare i problemi e raggiungere le soluzioni, spesso differiscono anche le concatenazioni logiche. Inevitabilmente uno mangia l'altro; dipende dal prestigio, dalla personalità, dal livello, dai complessi di ognuno, dall'incomunicabilità delle ottiche diversificate e, non da ultimo, dal fatto che in genere il "tecnico", interpellato in condizioni di emergenza, ha una carta in più: l'emergenza, appunto.

Sarà difficile, ed è forse utopistico pensare che si possa arrivare, in tempi accettabili, a inventare una figura intermedia di archeologo/architetto/ingegnere (solo per le strutture edilizie); questo comporterebbe la doppia laurea – evidentemente antieconomica – o almeno la laurea trasversale di cui oggi si discute. E allora per il momento bisogna per forza accontentarsi delle collaborazioni.

Siccome la realtà è quella che è, l'archeologo che per caso o per scelta venga a occuparsi di strutture edilizie, dovrebbe almeno essere in grado di stabilire un dialogo fattivo con il tecnico. E viceversa.

A questo scopo servirà a poco la conoscenza dei "moduli" dell'opera laterizia, l'esatta definizione del *lithostroton*, del numero delle scanalature della colonna o del conflitto angolare del fregio dorico, come pure il problema dei vitruviani *scamilli impares* dello stilobate. Sarà molto più utile sapere cosa significa che un muro ha subito uno schiacciamento, che una colonna può trovarsi a lavorare a pressoflessione, un intonaco in regime di carico di punta, che alcune lesioni si debbono a dilatazione termica, che i muri hanno comportamento statico diverso a seconda delle differenti sezioni, che molte soluzioni applicate o da applicare sono strettamente connesse alle qualità meccaniche dei materiali, o magari conoscere il concetto di interazione dei bulbi di pressione nei terreni fondali. E così via.

Queste note, scritte da un archeologo – e perciò con molti dei difetti di origine – e dirette a futuri archeologi non vogliono e non possono essere un trattato di "ingegneria romana", ché sarebbe ridicolo. Con esse voglio solo richiamare una problematica che in archeologia andrebbe tenuta presente, tanto nel proporre interpretazioni e/o ricostruzioni teoriche quanto nel richiedere, o subire, interventi da parte di "tecnici".

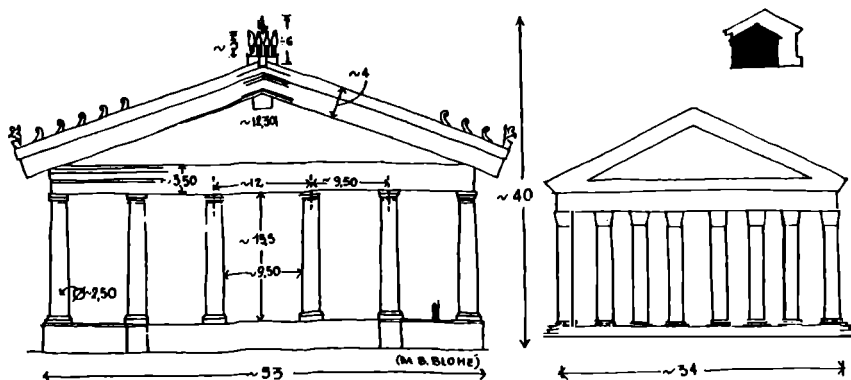
Proviamo a chiederci cosa direbbe un ingegnere se lo invitassimo a materializzare la ricostruzione corrente, generalmente accettata, del Tempio di Giove Capitolino: la figura 1 ne dà le dimensioni in rapporto a quelle del pronao del Pantheon, indicandone i materiali, dalle fondazioni all'alzato.

Però, se ipotesi come questa – e ce ne sono – continuano ad avere credito, una ragione dov'esserci. Forse dipende proprio dalla scelta, fatta tanto tempo fa dall'archeologia, di distinguersi dalla tecnica. Qualcuno stabilì che l'archeologia fosse "cultura" e lo fosse nell'accezione crociana del termine, cioè cultura letteraria. In altre parole, si scelse la via dell'opinione. Nel senso che rifuggendo dal quantitativo, dal numerico, dal preciso si imboccò la via del qualitativo, dell'opinabile, dell'approssimativo, in coerenza con l'equazione: letterario = cultura di serie A, tecnico = cultura di serie B (o non cultura).

Questa è una tara che affligge da tempo il modello intellettuale italiano, tanto da aver diffuso la mentalità per cui si dirà assai più facilmente che la cosa *x* è "vicina" alla cosa *y* piuttosto che quantificarne con un numero la distanza. Il numero essendo uguale per tutti eliminerebbe infatti i bizantinismi dal discorso, togliendo la libertà di interpretare il "vicino" in modo personale fino a poterlo addirittura considerare uguale al suo contrario. È come se il mondo antico fosse fatto per sfuggire alle leggi fisiche, matematiche, biologiche e così via.

Del resto l'intero problema è riconducibile a una questione di ottica che finisce per coinvolgere più o meno direttamente la tradizione degli studi di topografia antica.

L'architettura archeologica si trova infatti spesso legata in modo

FIGURA 1
La ricostruzione corrente del Tempio di Giove Ottimo Massimo a confronto con il pronao del Pantheon

stretto, e forse arbitrario, a questa disciplina. Essa già nel titolo ammette un contrasto: quello fra il concreto e il misurabile implicito nel sostantivo *topografia* e il qualitativo e l'opinabile – perciò ridimensionante – dell'aggettivo *antica* e/o *storica*.

Dal contrasto nasce la difficoltà di inquadrare la materia, che oltretutto in un secolo e mezzo si è profondamente trasformata.

E oggi la confusione è grande, tanto che chiunque, anche il meno preparato nello specifico e privo di supporti tecnici, pensa, in buona fede, di fare della topografia antica. Perché lentamente, e forse proprio per colpa dei topografi dell'antico, si è diffusa l'idea che svolgere questo tipo di ricerca sia lo stesso che discorrere di luoghi frequentati dagli antichi e/o di cui le fonti letterarie sembrano aver parlato. Al più si può integrare il discorso con una "piantina", non importa se precisa e significante.

E bisogna dire che in più di un caso questa visione del problema è anche giustificata e le membrane di separazione tra topografi e non topografi sono state erose.

La topografia resta comunque la disciplina nella quale si hanno più occasioni di imbattersi nell'architettura antica o, a essere più precisi, nel rudere dell'edilizia. Quando dico architettura archeologica mi riferisco appunto all'insieme delle fabbriche antiche, senza distinzione di qualità o entità di conservazione.

Ripeto per concludere quanto ho già detto, che questo non è un trattato sull'ingegneria romana e ancora meno sull'ingegneria edile in genere, ma piuttosto un tentativo di definire un'ottica, più che stabilire certezze. Un rimettere i piedi a terra, un prendere coscienza della vastità della gamma dei problemi legati all'analisi dei monumenti per raf-

freddare al massimo gli entusiasmi interpretativi e attribuzionistici. Questo per mettersi al riparo dalle letture apparentemente profonde e falsamente ovvie, finalizzate a confortare letture spesso prestabilite di fonti letterarie.

CAIROLI FULVIO GIULIANI

1

Alcune questioni preliminari

1.1. Il problema della cronologia

Non c'è dubbio che la definizione del "quando" abbia un valore decisivo negli studi archeologici per la comprensione della testimonianza antica. L'esigenza di datare su basi serie nacque almeno a partire dalla metà dell'Ottocento e si basò sul metodo stilistico considerato, allora come adesso, il più affidabile; esso, tra le altre cose, talvolta prende in considerazione anche gli aspetti tecnici.

Le architetture archeologiche, incluse nella serie innumerevole delle testimonianze dell'antichità, sono state coinvolte nel metodo e hanno seguito la stessa sorte con l'unica differenza di essere globalmente meno studiate e, soprattutto nel caso dell'architettura romana, di esserlo più per la decorazione che per la struttura vera e propria. Cosicché anche quando si affrontarono i muri, lo si fece con criteri estetici variegati di un certo evoluzionismo.

La situazione non è cambiata; in fondo ancora oggi si considera il "quasi reticolato" come una tecnica che precede il reticolato vero e proprio e non, più realisticamente, un reticolato mal fatto. Oppure si distribuisce l'"opera incerta" nel tempo sulla base della maggiore o minore raffinatezza apparente. Eccetera.

La cronologia dell'edilizia antica pone problemi particolari perché lo studio delle strutture murarie è nato per ultimo; perché non è possibile effettuarlo senza una consistente e laboriosa opera di integrazione; perché servono solide cognizioni tecniche; e poi, perché la cronologia di ogni costruzione è doppia: quella della progettazione e quella dell'esecuzione.

Queste operazioni, che possono avere avuto tempi anche tra loro diversissimi, ammettono entrambe un forte condizionamento nella ricostruzione dell'ambiente culturale (e quindi sociale) in cui ebbero luogo, ma non si è ancora messo a punto (né si intravedono serie possibilità in questa direzione) uno strumento affidabile per la datazione diverso da quello "stilistico".

Le cose poi si complicano perché questo metodo è utilizzabile soprattutto per la decorazione che quasi sempre manca e che, quando c'è, non è affatto detto che appartenga alla fase originaria, che sia del medesimo

progettista, che non sia attardata o anticipata rispetto al momento di esecuzione, che addirittura non sia di reimpiego ecc. La possibilità di un completo "fuori registro" culturale della decorazione, rispetto alla concezione ossaturale e spaziale dell'architettura, è sempre presente: valga per tutti l'esempio di Villa Adriana dove al presunto romanticismo *ante litteram* della decorazione corrisponde una concezione architettonica d'avanguardia.

In realtà trattare la decorazione non vuole dire studiare l'architettura ma semmai solo una parte.

Ci sono altri famosi equivoci dovuti all'esame stilistico della decorazione: le colonne augustee del Tempio dei Castori giudicate adrianee dallo Huelsen, o il cornicione assegnato al Tempio del Divo Giulio che oscilla tra la primissima età augustea (Fiechter) e quella di Settimio Severo (Huelsen); oppure il pluteo attribuito al *Lacus Curtius* collocato tra l'inizio del IV secolo d.C. (Huelsen, Strong) e l'ultimo quarto del I secolo a.C. (Welin, Von Heinze, Hafner, Coarelli); il fregio reimpiegato all'interno del timpano del Tempio di Saturno al Foro Romano posto all'età Traianea (Toebelmann) o in età tarda (Pensabene). Il tema della cronologia dunque, giustamente pressante in tutti i campi degli studi archeologici, nell'architettura sembra assumere valenze puramente convenzionali. Tanto che si legge nei manuali che il *Tabularium* è del 78 a.C., il Teatro di Pompeo del 55 a.C., la *Porticus Aemilia* del 192 e il suo rifacimento del 174, sempre a.C., e così via.

Nella realtà, invece, anche a non voler tenere conto di tutte le obiezioni precedenti, quello dell'edilizia è certo il campo che meno si presta alla determinazione della datazione assoluta: basterebbe pensare alla lunghezza del periodo di costruzione, anche ipotizzando che questa sia avvenuta senza interruzioni, per farsene capaci.

Prima di tutto dunque bisogna avere sempre presente che una costruzione, tranne i casi specialissimi di edifici di minime dimensioni, non può farsi risalire a un *anno*, ma sempre a un *periodo*.

A titolo di esempio si riportano i periodi di costruzione, noti dalle fonti, di alcuni monumenti: Teatro di Pompeo 6 anni, Foro di Augusto 40, Basilica Giulia oltre 10, Foro di Traiano 6, Colosseo circa 15, Villa Adriana almeno 20, Ponte Emilio 30; così la ricostruzione di Pompei, per il terremoto del 62, era largamente incompleta al momento della distruzione definitiva dopo 17 anni.

E poi si deve scegliere: datare l'edificio costruito vuol dire collocare nel tempo il quadro tecnologico che lo rese possibile, datare il progetto vuol dire stabilire anche il momento in cui nacquero, o erano comunque diffuse, le concezioni spaziali che informarono la fabbrica.

Rispetto a questo obiettivo può risultare secondario rintracciare la corrente di gusto che ne determinò l'aspetto decorativo.

In effetti la progettazione ha tempi minimi a fronte della costruzione, e potrebbe realmente collocarsi nell'ambito dell'anno. Il difficile, e spesso impossibile, è però riuscire a stabilire quali furono le vere caratteristiche del progetto originario dell'edificio. Infatti le variabili sono troppe, includendo non solo i cambiamenti avvenuti nel tempo per le più dispa-

rate ragioni, ma anche i banali ripensamenti in corso d'opera, i veri e propri cambiamenti di progetto, o anche il sacrificio di un progetto "ereditato" da un architetto che, non condividendolo, nell'esecuzione se ne discosta polemicamente.

Le vie percorse per arrivare alla cronologia di una architettura sono diverse:

a) quella *stilistica* che nella norma si fonda sulla considerazione del dettaglio decorativo;

b) quella *tecnica* basata sull'aspetto di superficie delle murature riferito a quello di monumenti di datazione ritenuta certa per altre vie (fonti letterarie, iconografiche ecc.);

c) quella *filologica* che si articola soprattutto sulla testimonianza preziosissima delle diverse fonti epigrafiche, letterarie, iconografiche ecc., talvolta però senza che si ritenga necessario appurare "oltre ogni ragionevole dubbio" che le fonti parlino veramente di "quel" monumento;

d) quella *associativa* che procede al "rimbalzo". Per esempio: la tecnica edilizia del monumento x si data al I secolo perché in esso è presente il pavimento musivo tipico di quel periodo. A indagare meglio ci si può accorgere che quel tipo di pavimento viene datato così solo perché è presente in una serie di strutture che per la tecnica edilizia si datano al I secolo. E il cerchio è chiuso; ma il processo può ricominciare datando il mosaico sulla base delle strutture, e poi di nuovo all'inverso. Lo stesso può qualche volta succedere per le pitture, gli stucchi ecc.

Naturalmente ognuno di questi metodi ha una sua validità relativa, e la loro combinazione aumenta le probabilità che ci si avvicini al vero. Però, a esaminarli uno per uno, ci si accorge dell'estrema labilità delle conclusioni a cui individualmente portano. La soggettività del primo è nota a tutti, e soprattutto è scarsamente incidente nel caso dell'architettura romana che scinde quasi sempre la parte strutturale da quella decorativa.

Il secondo non riesce a staccarsi dalla superficie della struttura, e quindi procede anch'esso in un certo senso su basi stilistiche applicate però alle cortine murarie, con in più delle screziature evoluzionistiche spesso nocive.

Ogni tentativo fatto in questo senso è risultato frustrante. Basterà ricordare a titolo di esempio il "modulo" proposto nel 1912 dalla Van Deman per l'opera laterizia, e comunemente poi accettato. Il sistema consiste nel misurare separatamente un numero stabilito di assise di mattoni – variante da 5 a 10 – e dei relativi letti della malta che le lega (eventualmente ripetendo l'operazione in più punti e facendo la media), e nel riferire poi la misura a una tabella composta dai moduli di edifici che si ritengono di datazione sicura. Così, per esempio, il modulo x risale all'imperatore tale, quello y all'imperatore talaltro. E questo nonostante le delusioni che seguono ai controlli modulari applicati a fabbriche di datazione accertata per vie diverse, e ai dati contraddittori riscontrabili perfino nell'ambito della stessa parete o sulle due facce opposte di un muro.

Si affronta dunque la muratura su un piano rigorosamente bidimen-

sionale, come se fosse una pittura. Anche solo per questo bisognerebbe superare il sistema a favore di un modulo che tenesse almeno conto della tridimensionalità della struttura.

Ormai si deve prendere atto del numero e della diversità delle cause che possono aver condizionato il modulo, alterando le conclusioni cronologiche.

La maggiore o minore compressione della muratura durante il tiro; la fluidità dell'impasto alla messa in opera; la particolare sollecitazione di una zona di muratura; la qualità della calce impiegata (se a tiro lento o rapido), della sabbia, della pozzolana, dell'acqua e perfino del grado della sua temperatura; la velocità dei tempi di costruzione; il periodo dell'anno in cui questa avvenne; le attitudini individuali del singolo muratore; la volontà speculativa dell'appaltatore e così via, sono tutti elementi che incidevano fortemente sul risultato finale del "modulo". Le cause delle sue varianti possono essere dunque così numerose, aleatorie, lontane da qualunque sistematicità cronologica che esso, soprattutto se usato da solo, non soltanto non può avere alcun peso, ma quasi sempre risulta fuorviante conferendo a sintomi funzionali valenze cronologiche.

Il terzo, quello filologico, offre l'efficacia dell'evidenza documentaria, ma è anche il più rischioso perché (se scisso da una solida preparazione tecnica e dalla capacità di dialogare con le strutture) può portare a conclusioni che hanno la forza della verità in quanto appoggiate, almeno apparentemente, su documentazione contemporanea o comunque vicina alla costruzione. È il metodo che presenta di più il pericolo di far dire quello che si preferisce ai resti monumentali.

Del quarto è inutile perfino parlare.

Né, d'altra parte, è facile individuare uno strumento di validità assoluta in assenza di una tecnologia affidabile per datare il manufatto dall'esterno, con sistemi non opinabili.

Allora non rimane che continuare a usare tutti questi sistemi in combinazione costante, in modo da istruire un processo indiziario il più completo e imparziale possibile.

Ma qualcosa si può aggiungere almeno per eliminare le ipotesi più fantasiose: un *quid* di misurabile, di quantificabile, altrimenti non si farebbe che sommare un'opinione a un'altra e questo non servirebbe.

La sola cosa che al momento sembra possedere il requisito è la logica strutturale, che non deve rispondere agli umori culturali o alle ideologie del momento, ma piuttosto alle leggi della visione meccanicistica che risale a Galilei e a Newton e che nel medio termine ancora funziona.

È essa che permette di verificare l'appartenenza di una certa struttura alla classe di edifici di cui parlano le fonti. La logica interna all'ossatura costruttiva, vincolata com'è tanto dalle leggi fisiche quanto da quelle economiche non meno ferree, diventa, se usata in modo appropriato, un riferimento prezioso nell'applicazione dei metodi esposti sopra e in sé scarsamente soddisfacenti.

A questo si deve aggiungere che per rintracciare la logica strutturale

è d'obbligo conoscere direttamente i resti archeologici e non per sentito dire o per averne letto.

Si debbono dunque rimettere i piedi a terra, considerare i dati per quello che sono e non servirsene come spunti per supposizioni suggestive. Troppi sono i monumenti avviliti a supporto di teorie preconcette di ipotesi storiche affascinanti, di quadri topografici sconnessi.

Tutto questo naturalmente non condurrà a grandi scoperte, né darà soluzioni univoche e neppure chiarirà le idee. Impedirà però che si abbocchi facilmente all'amo dei discorsi ben confezionati, ammanniti con tecnica filologica apparentemente corretta, a soluzioni geniali e tranquillizzanti ma senza i necessari riscontri con la realtà materiale e con la logica costruttiva e funzionale.

La datazione di un edificio è dunque cosa complessa. Lo è sempre, anche quando ci sono elementi apparentemente incontrovertibili a supportarla. Basterà l'esempio clamoroso, ma non unico, del Pantheon, che, pur recando l'iscrizione monumentale di Marco Agrippa sul frontone, non è di età augustea ma ci è pervenuto nell'integrale ricostruzione di Adriano. Lascio immaginare le polemiche e il malessere che nell'ambiente archeologico suscitò il riconoscimento di questo fatto.

Anche i casi più semplici, come per esempio il Colosseo, i Fori Imperiali, il Mausoleo di Adriano e tanti altri a guardare le cose da vicino, risultano complicati da restauri, rifacimenti, adattamenti, consolidamenti, demolizioni, ricostruzioni parziali o totali che confondono le acque delle fonti letterarie. Acque che poi limpide non sono neppure per fatti loro, rimanendo inquinate abbondantemente dalle intenzioni degli autori in primo luogo, dalla corruzione dei testi, dalle errate interpretazioni, o dal loro, a volte problematico, inserimento nel contesto.

Se ne deve concludere che la datazione assoluta è ancora più difficile che non lo stesso riconoscimento del monumento e la storia dell'architettura romana lo conferma in pieno. Si sa quali erano e come erano, almeno nelle grandi linee, i santuari di Ercole Vincitore a Tivoli, della Fortuna Primigenia a Palestrina, di Giove Anxur a Terracina, tanto per esemplificare, ma neppure di uno di essi si conosce la cronologia assoluta o, per lo meno, gli studiosi non sono tutti d'accordo; oppure ognuno crede alla propria.

Problema diverso, assai più semplice e perfettamente risolvibile, è invece la cronologia relativa di un contesto edilizio. Qui la giacitura reciproca, gli accostamenti, le connessioni, i rapporti statici, il tipo di sollecitazione a cui una membratura era sottoposta sono di grande aiuto e di soluzione quasi sempre certa.

Naturalmente possono esserci anche situazioni confuse, per esempio strutture più recenti che si trovano *sotto* altre più antiche, ma si tratta di interventi particolari tecnicamente giustificabili, facilmente riconoscibili per chi abbia una qualche esperienza in materia (cfr. cap. 9).

L'incertezza sostanziale nella determinazione della cronologia assoluta rispetto alla praticabilità di quella relativa, dipende dal fatto che mentre la prima si deve rifare per forza di cose a un sistema logico astratto, opinabile, non misurabile, la seconda è determinata da elementi comun-

que quantificabili e tangibili. Il che ripropone ancora una volta la necessità di ricondurre l'oggettività del commensurabile nella valutazione dell'architettura archeologica, perché ogni volta che ce ne allontaniamo finiamo nel gioco delle ipotesi senza controllo.

1.2. L'analisi del monumento

Se scrivo che un vano è composto da tale numero di pareti (ciascuna distinta da un numero o da una lettera) fatte di opera reticolata, mettiamo di tufo dell'Aniene, con *cubilia* di 7 cm di base. Se aggiungo che le pareti, alte, larghe e spesse tanto, hanno il nucleo di cementizio di malta pozzolanica, che la pozzolana è nera, che i cretoni sono medi e piccoli, e continuo con una serie infinita di informazioni minuziose di questo tipo non potrò mai, in buona fede, sostenere di aver fatto un'analisi tecnica di quel vano iniziale. Avrò solo steso una pedante descrizione la cui vera utilità sarà tutta da rintracciare.

L'analisi tecnica del monumento non serve a descrivere, anzi questo compito può essere affidato con risultati di maggiore oggettività e costrutto alla fotografia o alle tecniche grafiche analitiche computerizzate o alle USM (unità stratigrafiche murarie). Il suo scopo è invece quello di stabilire il carattere, la funzione, l'essenza e la possibilità di ricostruzione (teorica e pratica) dei resti edilizi antichi, in altre parole di capire di che si tratta, o almeno di che non si tratta. È questo poi in definitiva il primo passo del lungo percorso da fare per la storia dell'architettura antica, senza il quale si resta inevitabilmente o nella letteratura o nella schedatura.

Detto così sembra cosa da niente, ma stabilire l'entità originaria di una struttura architettonica vecchia di due millenni e più, priva di quasi tutta la superficie decorata e di gran parte dell'ossatura di alzato, e con le fondazioni spesso interrate, non è facile e può diventare un'impresa disperata o quanto meno velleitaria. A meno che non si preferisca la fittizia certezza della stima *a occhio*.

Prima di iniziare un qualunque discorso cominciamo dall'ovvio ponendo i confini del campo. Quello dei limiti è un argomento importante per stabilire l'ambito entro cui una disciplina agisce propriamente, e al di fuori del quale si può certo andare, ma con la coscienza di fare incursioni che potrebbero risultare confuse.

Non tutti i resti edilizi possono essere oggetto di analisi. Per questo bisogna che si conservi una parte che permetta, con i *segni* che reca in sé, di procedere a una ricostruzione, a una lettura che vada oltre la semplice notazione della sua esistenza. In altre parole, un masso di due metri cubi di conglomerato informe e di materiale usuale potrà servire nella definizione di un quadro topografico, ma non sarà di nessuna utilità per l'analisi dei monumenti. Un elemento magari di volume inferiore anche di molto, una lastra pavimentale con tracce dell'imposta di un monumento o con l'impianto geometrico di una costruzione da sovrapporre, può invece risultare prezioso.

Non si tratta dunque solo di quantità di elementi conservati ma anche e soprattutto del loro valore semantico. E di saperli riconoscere, leggere, valutare. A questo serve l'analisi dei monumenti antichi, a ricostruire attraverso un processo induttivo la parte mancante delle costruzioni sulla base delle tracce trasmesse e in modo compatibile con le leggi fisiche, con la tecnologia dell'epoca.

Perché sta sempre più perdendo senso dire approssimativamente *quando* (e da chi) quell'edificio si è costruito, bisognerà dire anche *come e perché.*

1.3. Considerazioni generali sulle strutture

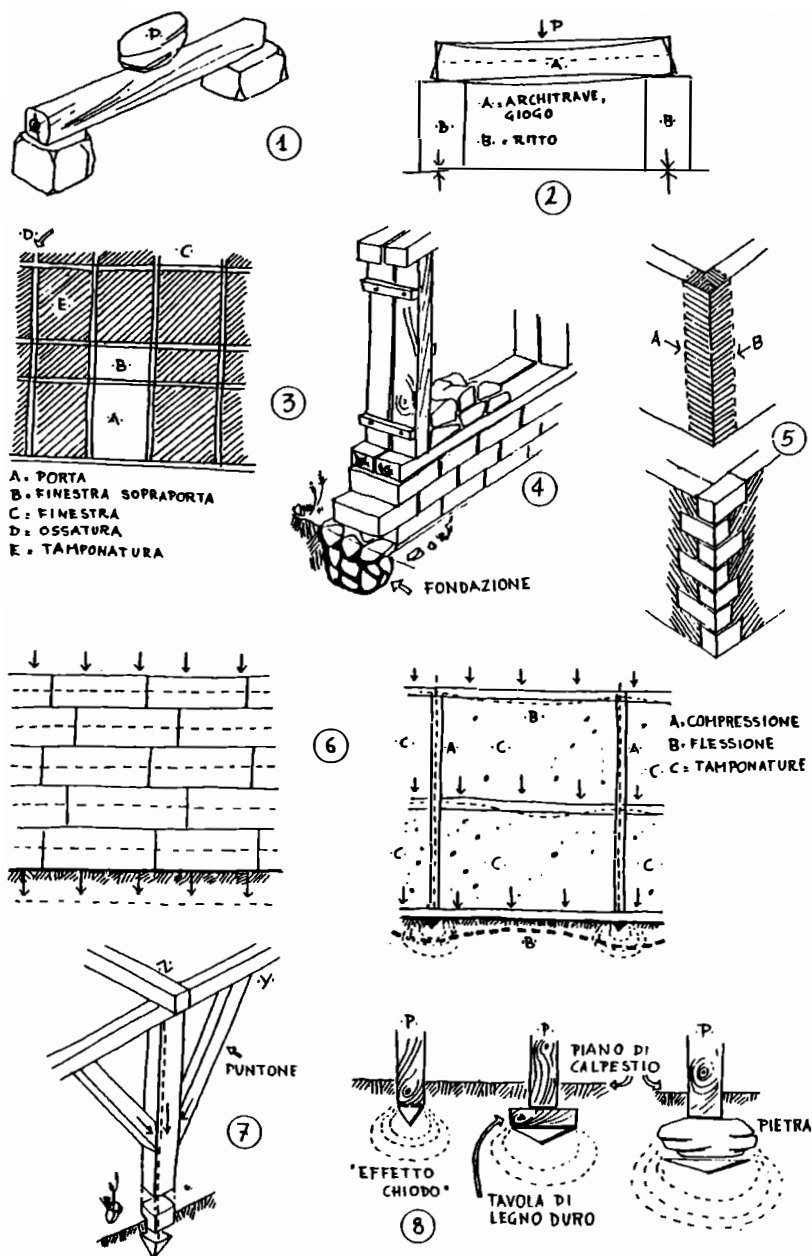
Un tronco poggiato con le estremità su due pietre è capace di sostenere grossi carichi fissi o accidentali lavorando a *pressoflessione* (fig. 1.1 dis. 1). Questa condizione corrisponde al principio fondamentale dello schema *trilitico.* Esso, indipendentemente dal materiale adoperato, risulta formato da due elementi verticali convenientemente distanziati (*ritti*) sulla cui sezione superiore si appoggia orizzontalmente il terzo elemento (*architrave o giogo*); (fig. 1.1 dis. 2).

La moltiplicazione complanare di questa cellula elementare dette luogo in antico a uno scheletro i cui vuoti potevano essere riempiti di materiali diversi (mattoni crudi, pietre a secco, rami intrecciati ecc.) a formare una lastra/parete. Eventuali cellule lasciate vuote diventavano porte e finestre (figg. 1.1 diss. 3, 4). In sostanza si aveva una ossatura portante sollecitata a *pressoflessione,* e tamponature che incidevano limitatamente nel comportamento statico di questo scheletro. Anche se a livello embrionale, è un po' quello che succede nelle strutture di cemento armato.

La combinazione di più *strutture/pareti* secondo i tre assi di riferimento dello spazio (x, y, z) realizzava il *vano* la cui moltiplicazione dava luogo all'*edificio complesso.* Così tutto l'organismo lavorava, almeno nelle grandi linee, a *pressoflessione* nelle membrature orizzontali e a *compressione* in quelle verticali (fig. 1.1 dis. 6).

L'estensione della struttura implicava, però, problemi di equilibrio nella distribuzione dei carichi, e quindi nella ripartizione delle tensioni interne alle membrature. Erano difetti ai quali, fin dall'inizio, si rimediò con opportuni interventi.

Facciamo l'esempio di una parete assimilabile a un solido parallelepipedo a sezione di base ridottissima in cui si verifichino tensioni interne, anche per le sole condizioni di giacitura. Se al momento della costruzione questa parete era composta di un'armatura adeguata e da zone aperte e altre tamponate, le tensioni alla ricerca di equilibrio aumentavano in quantità perdendo evidentemente di intensità, comunque esse risultavano per lo più dirette verso la periferia. Lungo il piano di contatto tra due pareti (spigolo) le tensioni si incontravano definendo così uno dei punti critici dell'organismo. La verifica sperimentale dovette portare ben presto a irrobustire questi punti (Cato, *De agr.*, 14, 1: «*villam aedificandam* [...] *faber haec faciat oportet: parietes omnes, uti iussitur, calce et*

FIGURA 1.1
Notazione sulle strutture in generale

caementis, pilas e lapide angulari») e il fenomeno fu talmente importante da divenire addirittura una immagine retorica: la *pietra angolare* appunto (fig. 1.1 dis. 5).

Per successive modifiche si rese sempre più complessa l'articolazione del sistema trilitico, ma il modo di trasmissione del carico rimase affidato alla pressoflessione e si articolò su risultanti assimilabili alla verticale.

Tornando al solido-parete si intuisce la maggiore complessità concettuale legata a una struttura di muratura a sacco innervata da un telaio ligneo, anche di piccole dimensioni, rispetto a quella, magari più grande, in opera quadrata. Infatti laddove in quella, in quanto disomogenea, si dovevano individuare i punti in cui convogliare le tensioni interne, in questa, più omogenea, si ripartivano i carichi su tutta la superficie per sezioni orizzontali continue.

Passando da una parete a un edificio vediamo che a una articolazione maggiore corrispondono problemi più complessi.

Questa concezione strutturale è alla base dell'organismo costruttivo composto da ritti e travi *tra loro solidali*, cioè di quella che più propriamente può essere chiamata l'*ossatura* della costruzione.

L'ossatura solidale venne poi a mancare nei fabbricati in muratura in cui generalmente i solai lignei, o le volte, erano sostenuti da solidi muri longitudinali e trasversali, sempre in muratura.

Il conflitto tra aree fabbricabili e volumi realizzabili fu avvertito subito (Vitr., 2, 8, 17) e si rispecchiò nella ricerca di materiali sempre più resistenti alla compressione; così si abbandonarono gli ingombranti muri continui di mattoni crudi per lo schema a pilastri portanti e travature resistenti.

Lo sviluppo in altezza, però, trovò il proprio limite nella scarsa solidarietà degli elementi ossaturali; questo limite verrà superato poi solo con le strutture metalliche e il calcestruzzo armato.

Il sistema di scarico delle forze a pressoflessione, proprio perché elementare, è stato alla base di ogni cultura architettonica: a esso fanno capo tutte le strutture *non spigenti*. L'esito formale più noto è il colonnato architravato tanto diffuso e così organicamente concepito da essere diventato subito un vero e proprio codice di riferimento per la lettura dimensionale di ogni edificio in cui comparisse. L'ordine architettonico si caricò quindi ben presto di significati che andarono al di là della stessa funzione strutturale, come mostra la diffusione nel mondo romano anche nella forma applicata a parete (o addirittura dipinta), per la quale è inutile ricercare una qualche valenza statica.

Almeno in teoria, dunque, il sistema era in grado di trasmettere al terreno sia il carico permanente sia quello accidentale con andamento verticale. Così le forze si incanalavano lungo l'ossatura disposta secondo i tre assi di riferimento (x, y, z). Quando era necessario si ponevano raccordi ausiliari a 45 gradi, i puntoni (fig. 1.1 dis. 7).

Proprio questa disposizione, spontanea per il sistema, determinava costruzioni ordite soprattutto per piani ortogonali e simmetrici, quindi sostanzialmente "regolari".

Dal momento che l'allontanarsi dalla regolarità comportava la ricerca

di nuovi equilibri, è difficile attribuire al caso deroghe sensibili. Perfino il concetto di simmetria, al di là della valenza estetica, ha un valore strutturale non trascurabile in quanto rende equilibrato l'organismo costruttivo rispetto al peso da trasmettere al terreno, come spiegano bene le raccomandazioni in tale senso emanate ancora nel secolo scorso per le ricostruzioni a seguito dei terremoti.

Questa tendenza naturale alla regolarità era valida naturalmente nell'articolazione intima di ogni singolo edificio; poi, però, si doveva tenere conto dell'intorno. Ecco allora che le costruzioni, in sé regolari, disposte magari lungo le curve stradali ad andamento "festonato" erano costrette a disporsi in assetto più organico, anche se apparentemente disordinato (fig. 1.2 dis. 1).

L'individuazione dei nodi strutturali dell'edificio (compatibilmente con l'interazione di altri vincoli quali la funzionalità, l'economia, la facilità di reperimento ecc.), portò presto alla differenziazione dei materiali da costruzione. L'uso contestuale di alzati in pietrame e coperture in legname e laterizio corrispose, sì, a un compromesso economico iniziale, ma si legò poi così intimamente alla realizzazione di particolari spazialità architettoniche che è assai difficile, se non impossibile, stabilire se la motivazione della scelta iniziale sia stata estetica, economica oppure tecnica.

Certo è che normalmente si avevano edifici le cui parti si trovavano in condizione diversa rispetto alle intemperie e alle sollecitazioni. I tetti con orditura lignea, con o senza manto di tegole, erano sempre soggetti a manutenzioni parziali, o rifacimenti totali, con periodicità assai più frequente di quella degli alzati (salvo, naturalmente, incidenti eccezionali). Basterebbe anche questa semplice circostanza a rendere complessa la vita di quell'archeologo che volesse interessarsi dello studio degli edifici antichi.

Ma al di là della banale distinzione dell'alzato in pietra o muratura e della copertura lignea, l'aumentare della complessità delle fabbriche, delle loro altezze e conseguentemente dei carichi, la necessità di coprire luci più ampie o di lasciare varchi più spaziosi nelle pareti, attivarono la ricerca di materiali diversi per differenti impieghi, e di soluzioni strutturali capaci di risolvere gli inconvenienti che a mano a mano insorgevano.

Come esempio ricordiamo l'uso di porre in fondazione, sulla verticale delle colonne, blocchi di pietra di qualità differente da quella del resto delle fondazioni, e capace di resistere meglio alle sollecitazioni del carico concentrato. Anche questo, che può apparire un accorgimento banale, certo dovette essere il risultato di fallimenti molteplici.

Lo schema trilitico, dunque, comportava che almeno un elemento lavorasse in parte a trazione: l'inconveniente maggiore era che tutti i materiali da costruzione disponibili in antico, erano molto resistenti alla compressione ma assai poco alla trazione se si escludono il ferro e il legno. E del resto il legno, presentando inconvenienti come la scarsa durata e la soggezione alla deformazione plastica, risultava inadatto a costruzioni monumentali pensate per durare a lungo inalterate, e il ferro, ancora costosissimo e relativamente raro, arrugginiva.

Il problema era dunque quello di individuare un procedimento costruttivo che assecondasse la resistenza alla compressione comune ai materiali da costruzione.

L'elemento adatto, l'arco, era a disposizione da tempo; se ne hanno esempi molto più antichi del suo fiorire come cardine dell'edilizia romana. Ma il suo impiego era stato sporadico e del tutto casuale e comunque applicato al di fuori di un contesto strutturale consapevole e adeguato.

La sua adozione comportò una vera e propria rivoluzione della cultura architettonica. Bisognava essere disposti, una volta individuato il nuovo sistema, ad assoggettarsi alle sue leggi evidentemente molto diverse da quelle del trilitico e tali anche da sovvertire le abitudini architettoniche e le concezioni spaziali di lunghissima tradizione.

Solo un'architettura non "intellettualizzata", distaccata dal continuo perfezionamento di concetti tramandati, disponibile alle innovazioni, alla progettazione e soprattutto provvista di una grande chiarezza nelle finalità costruttive poteva consentire una tale rivoluzione. La questione vera non fu dunque di immaginare un sistema nuovo, ma piuttosto di riconoscere le qualità e i vantaggi di uno già noto e di essere disposti a sacrificare a esso la certezza tranquillizzante della tradizione, in cambio di una flessibilità strutturale amplissima e piena di implicazioni estetiche assolutamente nuove.

È per questo che non ha senso ricercare l'"inventore dell'arco"; perché a ben guardare, l'arco preso in sé non ha un grande significato architettonico: esso ha invece un valore immenso in quanto è il solo strumento a disposizione che permette di sfruttare appieno le qualità di *tutti* i materiali da costruzione. L'arco infatti *lavora solo per compressione*, ma da solo serve a poco se non si è capaci di individuare, e di conseguenza contrastare, il gioco delle spinte che determina.

Ed è appunto questa la geniale intuizione dell'architettura romana: l'aver capito le esigenze della nuova struttura, e averle sfruttate pienamente liberandosi delle ristrettezze dello schema trilitico. E chissà se non fu proprio per questo suo intrinseco significato di vittoria tecnica che l'arco divenne anche un simbolo estetico, e infine politico e propagandistico.

Sappiamo che a Roma l'uso fu precoce: si applicava in serie già alla fine del III secolo a.C. (Liv., 22, 36, 8, infatti, cita una *via fornicata* in Campo Marzio nel 216). E tralasciando la copertura con volte a botte in parallelo della *Porticus Aemilia* del 193-2 a.C. (Liv., 35, 10, 12) abbiamo notizia di archi onorari al Circo Massimo e al Foro Boario per il 196 a.C. (Liv., 33, 27, 4), nel 190 si sa che Scipione costruì un arco in Campidoglio (Liv., 37, 3, 7), che nel 179 a.C. (Liv., 40, 51, 4) i censori M. Emilio Lepido e M.F. Nobiliore gettarono le pile del Ponte Emilio il quale, 37 anni dopo, fu terminato con i fornici impostati da P. Scipione Africano e L. Mummio diventando così il primo grande ponte ad archi mai costruito.

Abbiamo detto dunque che il limite della copertura delle luci con lo

schema trilitico coincideva con quello dell'elasticità del materiale impiegato, e che il superamento di questo limite di potè ottenere solo ricorrendo a un diverso modo di scaricare le spinte a terra.

Dove un solo blocco di pietra di una data sezione non poteva superare, poniamo, una luce maggiore di 5 m, una serie di piccoli blocchi dello stesso materiale, tagliati a cuneo e disposti ad arco, coprivano agevolmente uno spazio doppio. E mentre per l'architrave i 5 m erano il limite, per l'arco i 10 m erano solo una tappa: cambiando ancora forma e disposizione si poteva andare oltre.

Grazie a queste caratteristiche l'arco avrebbe avuto un futuro negato all'architrave, almeno fino a quando non si arrivò agli architravi sintetici, realizzati, però, in calcestruzzo armato.

Ogni organismo architettonico è sempre alla ricerca del proprio equilibrio, che raggiunge quando la resistenza della struttura è pari alla sollecitazione dei *carichi gravanti*, cosicché non si verifichino spostamenti di singole membrature, né per traslazione, né per rotazione.

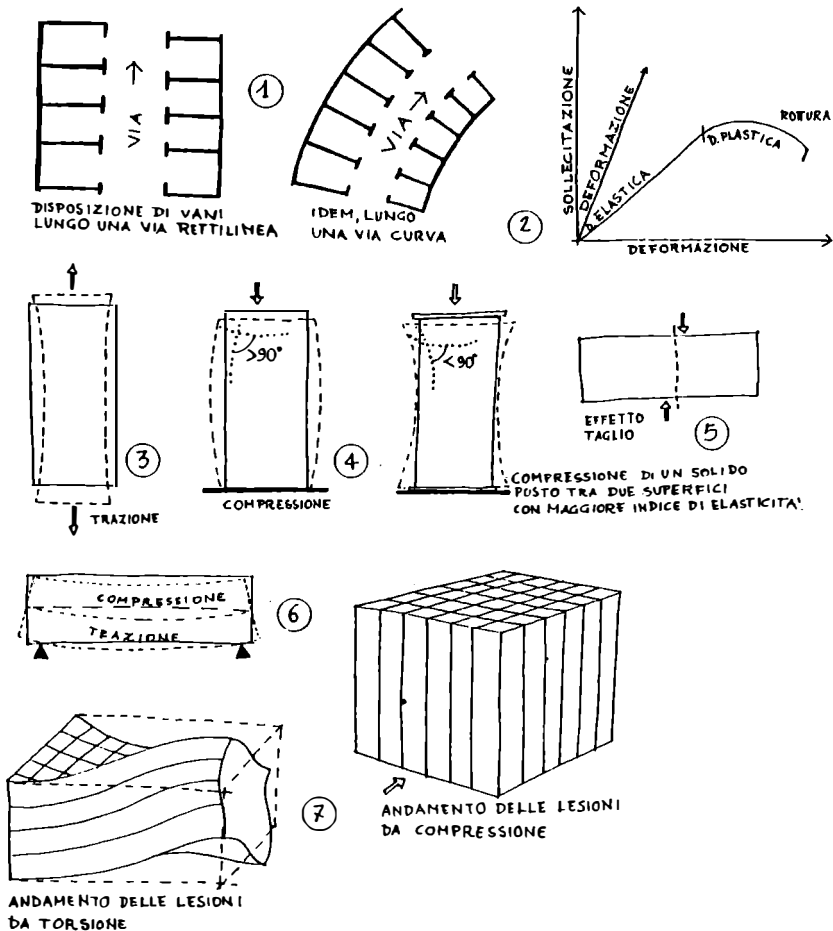
I carichi gravanti si distinguono in:

— *carichi permanenti* (=statici): che hanno carattere di continuità perché interni alla costruzione stessa, arredi fissi ecc. Sono dovuti al peso proprio della struttura portante e a quello della parte decorativa e di rifinitura;
— *carichi accidentali* (=dinamici): che sono discontinui perché estranei all'organismo. Si tratta di quelli determinati da movimenti del terreno, sia lenti, sia rapidi (smottamenti, frane, terremoti) agenti atmosferici (vento, neve, acqua); mobili, persone ecc. Si comprendono in essi anche gli assestamenti da ritiro delle malte, quelli del terreno fondale, le dilatazioni per escursione termica ecc.

Altri concetti riferibili al carico delle costruzioni sono:

— *carico di sicurezza*: si ha quando la somma dei carichi permanenti e di quelli accidentali resta al di sotto della capacità di resistenza del materiale;
— *carico concentrato*: è quello esercitato sulla struttura da elementi a sezione ristretta (colonna, pilastro, parete divisoria su un solaio ecc.);
— *carico ripartito*: si tratta delle forze distribuite su larghe superfici: il peso proprio della struttura, la neve su una copertura, l'acqua in una cisterna ecc. Il *carico uniformemente ripartito*: è invece un concetto teorico, a cui si ricorre nella formulazione di ipotesi (per esempio, quando si voglia immaginare un architrave caricato in modo uniforme in ogni suo punto materiale. È intuitivo che nella realtà costruttiva non esiste);
— *carico di punta*: si ha quando il peso si esercita su un solido fortemente sproporzionato nel rapporto tra sezione trasversale e altezza. Naturalmente il suo limite varia col materiale.

Quello della resistenza dei materiali è un tema di cui si occupa la Scienza delle costruzioni. Il principio fondamentale, largamente riscontra-

FIGURA 1.2
Considerazioni generali sulle strutture

bile nella realtà, è che *ogni solido materiale, sottoposto a sollecitazioni esterne, tende a deformarsi.*

La deformazione attraversa quattro fasi:

— *fase elastica*: il solido sollecitato è capace di riassumere la forma primitiva;
— *fase di snervamento*: inizia lo sfibramento irreversibile del materiale;
— *fase plastica*, in cui il solido è incapace di riprendere la forma originaria e resta in tutto o in parte deformato;
— *fase di frattura* (fig. 1.2 dis. 2).

Tutti i materiali sono dunque deformabili ma per convenzione nell'edilizia si è abituati a dividerli in:

— *materiali elastici*, cioè deformabili (legno, metalli, oggi il calcestruzzo armato);
— *materiali rigidi*, praticamente indeformabili (pietre naturali e artificiali, calcestruzzo ecc.).

Nelle strutture antiche si nota tuttavia come questa differenziazione sia convenzionale e molti materiali cosiddetti *rigidi* risultino invece deformati e quindi elastici, marmo compreso.

Le deformazioni possono aversi per:

— *trazione*: quando si ha l'allungamento del solido per allontanamento delle singole sezioni (fig. 1.2 dis. 3);
— *compressione* per il fenomeno contrario (fig. 1.2 dis. 4);
— *taglio* se si verifica lo scorrimento di una sezione rispetto a quella contigua (fig. 1.2 dis. 5).

La disomogeneità e la direzione di queste deformazioni determinano la *rotazione* che dà luogo a due risposte del solido:

— la *flessione*, quando la rotazione delle sezioni avviene rispetto a un asse perpendicolare alle sezioni medesime (fig. 1.2 dis. 6);
— la *torsione* quando la rotazione si riferisce a un asse che giace sulla sezione (fig. 1.2 dis. 7).

Siccome ogni solido tende per sua natura a mantenere la propria forma, le alterazioni di questa provocano una reazione che si risolve in *tensioni interne*. Esse sono presenti anche quando la sollecitazione resta al di sotto del *limite di elasticità* (oltre il quale inizia la deformazione plastica). È per questo che possiamo sostenere che un architrave di pietra, caricato, anche se apparentemente non si deforma, nella realtà *tende a deformarsi* e al suo interno le tensioni definiscono *una zona che si trova in stato di trazione, un asse neutro e una zona in compressione* (cfr. figg. 1.1 e 1.2).

Le differenti sollecitazioni si risolvono in:

a) *compressione-trazione*: immaginiamo un parallelepipedo sollecitato da una sola forza uniforme, perpendicolare alla sezione di appoggio: il solido tende ad accorciarsi per compressione. Se lo stesso solido viene sollevato per l'estremità superiore (per esempio, messa in opera di una colonna) il suo stesso peso lo metterà in trazione;

b) *flessione-torsione*: se il solido è sollecitato da una coppia di forze ne risultano tensioni disomogenee che provocano flessione (se le due forze giacciono su un piano longitudinale e perpendicolare a quello delle sezioni), o torsione (se esse giacciono su un piano trasversale e parallelo a quello delle sezioni);

c) *taglio-flessione* se il carico è trasversale alla sezione e passa per il baricentro;

d) *pressoflessione-taglio*: se la sollecitazione ha andamento inclina-

to rispetto al piano delle sezioni si possono avere contemporaneamente compressione (o trazione), flessione e taglio.

Un corpo nello spazio ha 6 gradi di movimento: 3 *traslazioni* secondo gli assi *x, y, z* e 3 *rotazioni* (*k, φ, ω*) rispetto agli stessi assi. Per impedire questi movimenti servono 6 *vincoli* a cui corrisponderanno da parte del corpo altrettante *reazioni vincolari*. Se trasferiamo il discorso a un solido giacente su un piano, come avviene nel caso dell'edilizia, le libertà del solido si riducono a 2 *traslazioni* secondo gli assi *x* e *y*, e 1 *rotazione* (*k*) attorno all'asse perpendicolare al piano di giacitura. Quindi 3 *libertà* per impedire le quali serviranno 3 *vincoli* che provocheranno altrettante *reazioni vincolari*.

Tutte le ossature architettoniche, soprattutto quelle antiche, puntando a definire un sistema il più possibile rigido e indeformabile, devono stabilire collegamenti reciproci per ridurre al minimo le possibilità di spostamento. Questi collegamenti sono appunto i vincoli, che rispetto all'ossatura possono essere *interni* o *esterni* se si riferiscono a possibili movimenti di essa rispetto al terreno.

Nell'edilizia dunque ci sono tre possibilità di movimento e altrettanti tipi di vincolo:

— *appoggio semplice*: è quello più noto e diffuso. Si ha nel sistema trilitico e si oppone alla sola traslazione dell'architrave (o membratura assimilabile) nella direzione perpendicolare al piano di appoggio;
— *cerniera*: è un vincolo doppio (*x* e *y*) che consente la rotazione. Notissimo nell'antichità per applicazioni meccaniche, non risulta mai adoperato in architettura; ignoriamo se lo fu nelle costruzioni lignee;
— *incastro*: si oppone a tutte e tre le libertà del solido giacente su un piano, quindi è un vincolo triplice. Costituito da tre appoggi semplici, contrasta le due traslazioni e la rotazione. È esemplificato dalla trave incastrata a muro (mensola).

2

Elementi che influenzano la lettura delle strutture

2.1. La gerarchia progettuale

L'iter della progettazione, al contrario di quanto siamo abituati a fare esaminando un edificio, procede di necessità dall'alto verso il basso, quindi copertura-alzati-fondazioni (fig. 2.1 dis. 1).

Leon Battista Alberti (*De Re Aed.*, 2, 1, 20) pose il problema in modo chiarissimo:

> Innanzi tutto bisognerà provvedere a che la concezione della copertura sia la migliore possibile [...] giacché si può dire che non solo le pareti e tutto ciò che ad esse è collegato, ma anche quelle parti che sono sotterranee, come le condutture di adduzione e deduzione dell'acqua, quelle delle acque pluviali, le cloache e simili furono concepiti in funzione delle coperture.

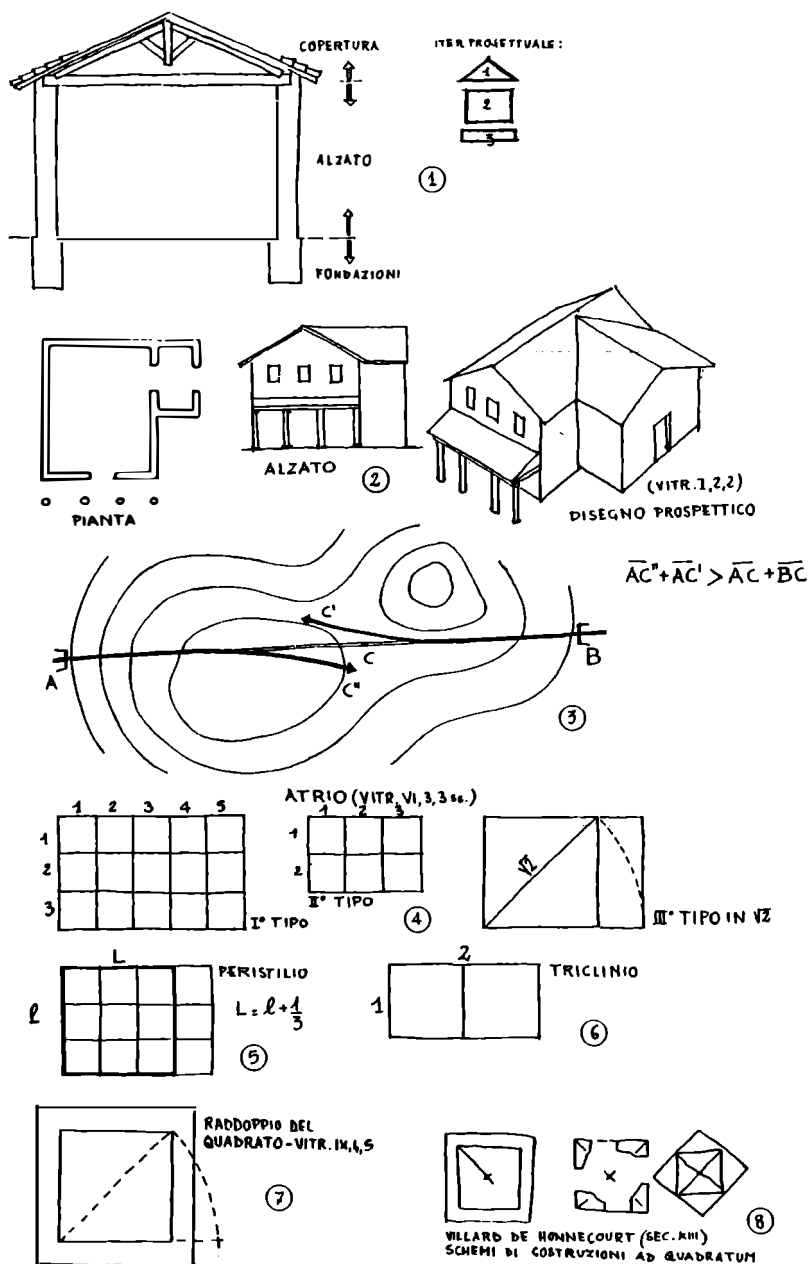
Era infatti proprio la copertura a determinare la scelta del materiale, la direzione delle spinte, la loro entità ecc. Tutto questo era evidentemente noto agli antichi se Vitruvio (2, 4, 2), sconsigliava di usare nelle malte la sabbia marina perché, tra i vari difetti, era inadatta a sostenere le volte («*neque concamerationes recipit*»).

Il problema si manifesta anche in una frase di Plinio il Giovane (lett. a Traiano 39-40) a proposito della ricostruzione del ginnasio di Nicea:

> e poi l'architetto, certo ostile a quello che aveva cominciato la ricostruzione, sostiene che i muri d'ambito, anche se spessi 22 piedi [oltre 6 m] non sono in grado di reggere al carico previsto perché sono realizzati con pietrame frammisto e cocci, senza la cortina laterizia.

Le leggi della statica restano valide per qualunque epoca. D'altra parte sappiamo che greci e romani affrontavano il tema progettuale con strumenti assai simili ai nostri. Ce ne convince Vitruvio (1, 2, 2) quando dice:

> i mezzi di rappresentazione del progetto sono tre: *pianta, alzato* e *disegno prospettico* [fig. 2.1 dis. 2]. La pianta comporta il giusto uso del compasso e della riga e da essa si ricavano le forme delle aree in piano. Il prospetto è la forma della facciata delineata con le proporzioni che dovrà avere l'opera. Il disegno prospettico è lo schizzo della facciata e dei lati in obliquo [scorcio], con la convergenza di tutte le linee al centro del compasso [una specie di prospettiva cen-

FIGURA 2.1
Progettazione

trale]. Queste rappresentazioni si originano dalla *cogitatio* e dalla *inventio*. La *cogitatio* è il tendere con lo studio e l'attenzione a raggiungere il risultato voluto con sensazioni gradevoli, l'*inventio* è la risoluzione dei vari problemi e la proposta di nuove soluzioni con intelligenza. Queste sono le caratteristiche del progetto.

Dunque i punti nodali della progettazione sono tutti a fuoco.

Particolare è il riferimento alla rappresentazione attraverso il *disegno prospettico* che testimonia come fosse normale l'uso della raffigurazione tridimensionale naturalistica, e quindi comprensiva delle deformazioni ottiche più o meno corrette. Si cercava in sostanza di mostrare al committente come si sarebbe presentato l'edificio quasi con intenzione impressionistica. Si dovrà attendere il XV secolo per vedere affermato un concetto diverso. È ancora l'Alberti (*De Re Aed.*, 2, 1, 20) a toccare il problema, sostenendo che tra il prodotto grafico del pittore e quello dell'architetto c'è questa sostanziale differenza:

che mentre il pittore si adopera per far risaltare dal piano oggetti in rilievo servendosi delle ombre e delle deformazioni degli angoli e delle dimensioni, l'architetto evitando le ombre rappresenta i rilievi nell'illustrazione della pianta e in altri grafici l'aspetto e le dimensioni di ciascuna facciata e di ogni lato ricorrendo a linee costanti ed angoli reali, così come chi vuole che la propria opera non sia valutata per apparenze illusorie ma piuttosto per misure precise e controllabili.

Tenuto conto di questa distinzione, i sistemi di progettazione erano praticamente gli stessi; semmai un dubbio riguarda le modalità di lettura e di estrapolazione dei dati del grafico da parte delle maestranze.

È probabile che il progettista seguisse spesso da vicino i lavori e facesse egli stesso da tramite: siamo però certi che questa non fu una regola fissa.

Un'iscrizione trovata a Lambaesis, in Algeria, (CIL, VIII, 2728) testimonia anche dell'uso di affidare il progetto alle maestranze incaricate di realizzarlo. È il testo di una lettera inviata nel 152 d.C. dal procuratore Vario Clemente da Saldae al legato della III legione Augusta, di stanza appunto a Lambaesis, con cui si richiedeva l'invio dell'ingegnere idraulico (*librator*) Nonio Dato, in forza presso quella legione. Questo perché i due cantieri, che stavano perforando da direzioni opposte un monte (attuale El Anaia) su progetto dello stesso Nonio Dato steso tre anni avanti per il procuratore Petronio Celere, avevano percorso tratti che, sommati, davano una distanza superiore a quella tra le due imboccature. Segno che le squadre non si erano incontrate e, superatesi, vagavano nell'incertezza. Nonio riscontrò che gli scavi si erano allontanati dall'allineamento stabilito e così, mentre il tratto a monte piegava a destra verso sud, quello a valle, piegando pure a destra, andava verso nord. Al di là dei particolari, il testo ci informa sulla redazione dei progetti in generale, sul bagaglio culturale degli ingegneri idraulici e sulla loro specializzazione, ma anche sulla circostanza che un progettista non fosse affatto tenuto a seguire i lavori di persona. Neanche in un caso complesso come quello di Saldae. D'altra parte inconvenienti del genere (fig. 2.1 dis. 3) si verificavano con una certa frequenza (per esempio, nell'emissario del lago di

Albano), nonostante il sistema fosse ben sperimentato. La notizia più antica che si ha su questo tipo di lavori riguarda infatti l'acquedotto di Samo, realizzato da Eupalino di Megara nell'ultimo quarto del VI secolo a.C. (Erod., III, 60); lungo circa 1 km fu iniziato dai due lati contemporaneamente ed ebbe un fuori asse di appena m 0,60. L'acquedotto fu ritrovato nel 1882 (Kienast, 1983).

Un ulteriore problema è posto dalla progettazione degli alzati. Infatti se è vero, come abbiamo visto, che Vitruvio cita esplicitamente anche questo tipo di rappresentazione, non siamo però sicurissimi che si riferisca a vere e proprie sezioni come le intendiamo noi. Certo è che, escludendo l'esistenza di questi grafici, riesce assai più difficile immaginare molte realizzazioni architettoniche. Per fare un esempio basta pensare ai grandi complessi termali della Roma imperiale che univano ai problemi di tutte le grandi strutture quelli del funzionamento dell'apparato idraulico e dell'inserimento in un tessuto urbano fortemente condizionato dall'orografia.

Inoltre, come s'è visto poi dall'esempio di Nonio Dato, esistevano ingegneri specializzati, i *libratores,* il cui compito principale era proprio quello di realizzare delle livellazioni e queste, soprattutto nel caso degli acquedotti, delle bonifiche ecc., dovevano trovare nelle sezioni grafiche il mezzo di espressione più facile e naturale. Del resto pure al concetto di sezione è legato il metodo della quotatura per *cultellatio* espresso da Vitruvio, tutti i principi base erano da gran tempo noti alla geometria, e in fin dei conti la sezione altro non è che una pianta condotta su un piano verticale anziché su quello orizzontale.

Quindi possiamo concludere che, magari con le caratteristiche pittoriche delle "vedute d'interno" note per tante illustrazioni medievali, è molto probabile che le sezioni venissero usate anche nell'antichità.

Le informazioni sugli alzati hanno bisogno, però, di molti elaborati grafici sia di massima sia di dettaglio. Uso, questo, che immaginiamo poco diffuso nell'antichità, a meno di non supporre dei sistemi codificati per desumere dalle planimetrie un numero consistente di informazioni riguardanti gli alzati.

Si sa che nel Medioevo esistevano queste regole, che tenute rigidamente segrete, erano tramandate solo tra addetti ai lavori. Ancora nel 1459 i maestri tagliapietre di Strasburgo, Vienna e Salisburgo, convenuti a Ratisbona per la riunificazione degli statuti delle logge, dettavano: «[...] così nessun operaio, nessun maestro, nessun *parlier,* nessun avventizio insegnerà a chiunque non sia del nostro mestiere e non abbia mai fatto il lavoro del muratore, come si deduca l'alzato dalla pianta».

Solo pochi anni dopo, nel 1486, l'architetto tedesco Roriczer pubblicò il *Libro della costruzione esatta dei pinnacoli* in cui chiarì il metodo per derivare l'alzato di un pinnacolo dalla pianta. Gli stessi schemi usati dal Roriczer – e quindi lo stesso metodo – compaiono anche nel famoso taccuino di Villard de Honnecourt (XIII sec.) al cui tempo il sistema era tenuto ancora rigidamente segreto.

Pur non essendone ovviamente certissimi, possiamo ipotizzare che qualcosa del genere esistesse anche nell'antichità. Vitruvio cita diversi

casi in cui l'alzato viene dimensionato sulla base delle misure della pianta. I costruttori antichi, stando almeno a quelle informazioni che sono filtrate attraverso Vitruvio, sembra si rifacessero per lo più a rapporti semplici. Il sistema di usare la proporzione eliminava molti degli inconvenienti che potevano derivare dalla mancata applicazione della scala di riduzione. Vitruvio, per esempio, divide gli atrii in tre tipi basandosi sul sistema proporzionale (6, 3, 3 ss.):

nel primo tipo si divide in 5 parti la lunghezza e se ne danno tre alla larghezza; nel secondo la lunghezza si divide in tre parti e due se ne danno alla larghezza; nel terzo, dopo aver disegnato una pianta quadrata, se ne tracci la diagonale: la lunghezza di questa si attribuirà alla lunghezza dell'atrio [fig. 2.1 dis. 4]. In tutti e tre i casi l'altezza del vano calcolata sotto l'architrave deve essere pari a 1/4 della lunghezza, lo spessore dei lacunari ecc. va calcolato al di sopra delle travi.

Per quanto riguarda l'ampiezza delle *alae* anch'essa risultava proporzionale alla profondità dell'atrio secondo la tabella seguente (Vitr., 6, 3, 4):

— per atrio lungo 30/40 piedi: *alae* larghe 1/3;
— per atrio lungo 40/50 piedi: *alae* larghe 1/3 + 7/12;
— per atrio lungo 50/60 piedi: *alae* larghe 1/4;
— per atrio lungo 60/80 piedi: *alae* larghe 1/4 + 1/2;
— per atrio lungo 80/100 piedi: *alae* larghe 1/5.

Il tablino era invece proporzionato sulla larghezza dell'atrio (Vitr., 6, 3, 5):

— per atrio largo 20 piedi: tablino largo 2/3;
— per atrio largo 30/40 piedi: tablino largo 1/2;
— per atrio largo 40/60 piedi: tablino largo 2/5.

L'altezza del tablino invece doveva essere sempre uguale alla larghezza aumentata di 1/8. E Vitruvio continua così per la larghezza delle *fauces*, per quella delle porte, del compluvio ecc. (6, 3, 6). Per il peristilio stabilisce la lunghezza pari alla larghezza aumentata di 1/3 (6, 3, 7; segue poi il dimensionamento degli alzati). Nei triclini il rapporto è fissato 1:2 (6, 3, 8).

Come si vede in mancanza delle scale di riduzione si preferiva procedere per rapporti proporzionali semplici (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/8, 2/3, 2/5, 3/5, 7/12, radice di 2 ecc.).

Nel caso della planimetria dell'atrio, del peristilio e del triclinio c'è anche la prova che si procedeva *ad quadratum*: il peristilio risulta come un rettangolo derivato da un quadrato diviso in 9 quadrati con l'aggiunta di una serie di 3, e il triclinio è uguale a due quadrati (fig. 2.1 diss. 5, 6).

Del resto a Vitruvio era ben noto anche il sistema del raddoppio del quadrato (Vitr., 9, 4, 5) illustrato da Platone (Meno, 82 ss.):

Fra le sue utilissime considerazioni [di Platone] ne esporrò soltanto una, così come egli l'ha sviluppata. Data un'area o un campo quadrato che sia necessario

raddoppiare, siccome la soluzione non si trova in numeri con la moltiplicazione, si procede con eleganti tracciati di linee. Un'area quadrata che sia lunga e larga 10 piedi darà una superficie di 100 piedi quadrati. Se essa si vuole raddoppiare portandola a 200 piedi, e con lati uguali, bisognerà cercare quale lunghezza debba avere il lato in base al quale 200 piedi equivalgono al raddoppio dell'area. Questo non si può trovare in cifre: infatti se si stabilisce una figura di 14 piedi, il calcolo darà 196 piedi, se di 15, darà 225 piedi.

Dunque siccome non si può risolvere il problema per mezzo del calcolo numerico, bisognerà procedere così: si tracci la diagonale del quadrato di 10 piedi in modo tale da separare due triangoli uguali, ognuno di 50 piedi quadrati; secondo la lunghezza della diagonale si deve tracciare un'area quadrata. Così come nel quadrato minore con la diagonale si avevano due triangoli di 50 piedi di superficie in quello maggiore verranno determinati 4 triangoli della stessa dimensione.

Raddoppio con il sistema grafico secondo Platone, come nello schema tracciato e spiegato in fondo pagina.

La figura di Vitruvio è andata purtroppo perduta, ma il sistema continuò ad avere una grande fortuna nel Medioevo per il dimensionamento proporzionale delle architetture come dimostrano i grafici di Villard de Honnecourt (fig. 2.1 dis. 7) e di Roriczer.

Non possiamo neanche escludere che per la progettazione nell'antichità si usassero modelli in scala non solo per rendere più leggibile il progetto della committenza, ma per poter apportare tutte quelle modifiche che la rappresentazione volumetrica evidenziava, e anche per tentare una verifica di stabilità.

Sappiamo che i modelli in scala (anche con particolari al vero) ebbero grande diffusione nel Rinascimento (lanterna della cupola di Santa Maria del Fiore, cupola di San Pietro, cornicione di Palazzo Farnese ecc.) ma sappiamo pure che erano già molto diffusi nell'architettura gotica.

L'Alberti (*De Re Aed.*, II, I, 21) ne illustra i vantaggi quando dice che il modello

consente di verificare chiaramente [...] la collocazione della costruzione nell'ambiente e la sua distribuzione nell'area, il numero e la disposizione delle parti dell'organismo, l'aspetto delle facciate e la saldezza delle coperture e di ogni altra cosa.

E continua dicendo che

sulla base del modello si potrà senza inconvenienti aggiungere, eliminare, modificare, innovare e perfino sconvolgere totalmente il primitivo progetto così da raggiungere la soluzione pienamente soddisfacente.

L'eccessiva fiducia nell'uso del modello per la verifica di stabilità che non poteva tenere conto del rapporto tra dimensioni e caratteristiche meccaniche dei materiali, era stato e sarà ancora per diverso tempo causa di molti dissesti strutturali in corso d'opera. Si dovette aspettare Galileo Galilei perché si gettassero le basi della Scienza delle costruzioni.

L'uso dei modelli architettonici nell'antichità, anche se non provato

direttamente da fonti letterarie o rinvenimenti archeologici che lo dimostrino specificamente, pure è facilmente ipotizzabile sulla base dei diffusi e molto antichi modellini votivi o funzionali di edifici (per esempio: le urne cinerarie a capanna, i tempietti delle stipi, le lucerne che riproducevano il faro di Alessandria ecc.) realizzati per lo più in terracotta, ma anche in materiali diversi come il piombo.

2.2. Struttura portante e decorazione

Nell'architettura romana solo in alcuni temi costruttivi come il tempio (e neppure sempre) in cui il valore della tradizione ha avuto un alto coefficiente di viscosità, c'è identità tra struttura e decorazione.

Spesso le ragioni per cui un edificio romano sta in piedi sono molto diverse da quelle che appaiono a prima vista; mentre nell'edilizia greca il rapporto è molto più esplicito. Gli esempi di questa specie di "illusionismo strutturale" sono molti. Si va dalle piattabande foderate di marmi, così da apparire architravi (cfr. fig. 3.23), all'applicazione della "piattabanda di scarico" in luogo del fregio a proteggere l'architrave (Tempio dei Castori al Foro Romano; cfr. fig. 3.23 dis. 2); dalle mensole (o anche colonne) sottoposte ai pennacchi delle volte a crociera all'uso, anche se raro, di archi aggettanti dall'intradosso a sostegno apparente delle volte (grande Aula dei Mercati di Traiano).

L'indipendenza della decorazione (quella di marmo come quella di stucco) dalla struttura resistente può, evidentemente, creare dei problemi o degli equivoci per la definizione della cronologia di un edificio se non se ne appura in via preliminare l'appartenenza o meno alla fase originaria.

E forse non possiamo neppure escludere che la decorazione fosse affidata non solo a maestranze diverse – come sarebbe normale – ma anche a progettisti differenti.

2.3. La continua ricerca di equilibrio

Ogni edificio, inteso come costruzione complessa che trasmette i carichi permanenti e quelli accidentali nel modo più omogeneo possibile sul piano fondale, è, per forza di cose, un organismo instabile. Le variazioni dei carichi accidentali o la dislocazione di quelli permanenti (carichi ripartiti e carichi concentrati), i moti del terreno (sia lenti sia accelerati come assestamenti, interazione dei bulbi di pressione, vibrazioni da traffico, smottamenti, terremoti) che si verificano nel tempo, sono tutti elementi che determinano questa "instabilità" sostanziale.

A questo proposito va ricordato che anche nell'antichità le vibrazioni dovute al traffico incidevano sulla stabilità delle costruzioni – certo con effetti e in misura decisamente inferiori a quelli attuali –. Lo desumiamo da episodi come quello dei danni causati al sistema fognario urbano durante il trasporto delle quattro grandi colonne di marmo lucullco (alte

oltre 11 m) destinate alla casa di Emilio Scauro sul Palatino (Cic., *De offic.*, I, 138; Ascon., *In Scaur.*, 23; Plin., *N.H.*, 36,6). O anche da quanto afferma Plinio il Giovane (*Paneg. Traian.*, 51) che, lodando la moderazione di Traiano nel costruire nuovi edifici e la sua diligenza nel conservare quelli esistenti conclude:

così non succede come una volta [trasparente allusione a Domiziano] quando per il trasporto dei marmi enormi si squassavano i fabbricati urbani, ma le case stanno ben salde ed i templi non vibrano più.

È facile immaginare che quanto più è lunga la vita di una struttura edilizia tanto più numerose sono le occasioni di sollecitazione e l'insieme delle reazioni delle murature che si concretizza nel quadro fessurativo dovuto alla ricerca dell'equilibrio pregiudicato. Queste lesioni, che possono manifestarsi anche a una certa distanza di tempo dalla causa scatenante, sono, come accennato, di varia consistenza (dalle microlesioni interne al nucleo di calcestruzzo e per il normale ritiro delle malte, fino ai fenomeni macroscopici dovuti a veri e propri dissesti statici che preludono al crollo).

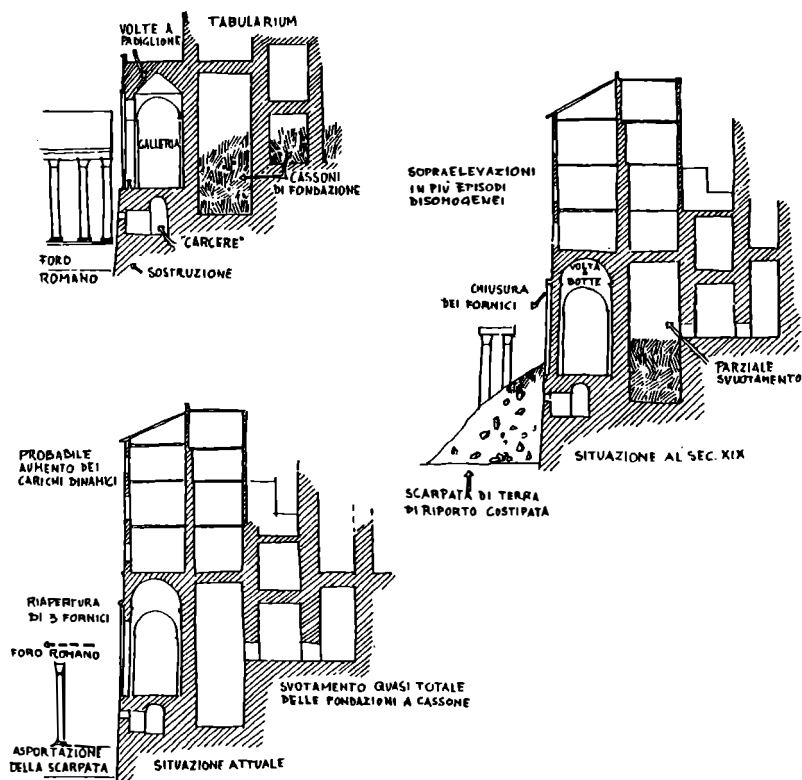
Non è pensabile in questa sede, e peraltro sarebbe fuori di competenza, tracciare, neppure per grandi linee, una campionatura di lesioni sufficientemente ampia. Qui interessa soprattutto il fatto che esse sono sempre effetto di cause precise e che il loro studio, affidato a persone competenti, permette spesso di risalire a quelle cause. Quanto più le lesioni sono antiche tanto più permettono osservazioni importanti per la storia dell'edificio (individuazione di interventi di consolidamento, ricostruzione di particolari perduti, definizione dei sistemi di copertura originari ecc.).

Per un esame approfondito della materia si rimanda a S. Mastrodicasa (1981).

2.4. Squilibri di carico per cambiamenti di funzione

È rarissimo che nella sua lunga vita un edificio "archeologico" non abbia subito consistenti cambiamenti d'uso (come è successo per il Pantheon). Se questi cambiamenti provocano ristrutturazioni consistenti, varia di conseguenza il regime dei carichi permanenti e accidentali. La variazione, che può essere positiva se i carichi aumentano, ma anche negativa per parziali demolizioni, altera l'equilibrio raggiunto nella fase precedente. È anche difficile che nei secoli non cambino le condizioni di giacitura e consistenza del piano fondale. Anche in questi casi si avrà una ricerca di nuovi equilibri e la comparsa di lesioni più o meno evidenti.

A chiarire meglio il problema servirà l'esempio, per grandissime linee, del *Tabularium* di Roma costruito nel I secolo a.C. È incerto se la data del 78 a.C. sia da riferirsi all'inizio dei lavori, alla loro fine o al semplice compimento della *substructio* e del *tabularium* citati nelle epigrafi CIL, VI, 1313-14 e 31597, che possono anche essere stati solo parte di un

FIGURA 2.2
Vicende strutturali del *Tabularium*

fabbricato più vasto, di cui al momento ignoriamo nome e destinazione. Q. Lutazio Catulo infatti può essersi occupato della realizzazione di un solo lotto di lavori secondo un uso largamente testimoniato nell'antichità. Esso ebbe una struttura affacciata sul Foro Romano (la galleria) e un grande corpo arretrato, certamente a più piani, su una superficie ristretta rispetto al perimetro massimo dei resti dello spiccato come mostrano le grandi fondazioni a cassoni alle spalle della galleria (fig. 2.2).

In un momento non esattamente definito del Medioevo, dopo l'abbattimento della fabbrica principale che aveva avuto già ristrutturazioni in età imperiale, si procedette alla ricostruzione episodica secondo concezioni strutturali differenti fino a raggiungere l'aspetto e la precarietà statica attuali. I motivi di questa sono tanti ma tutti risalgono al sostanziale disordine costruttivo.

Per esempio, gli 11 episodi strutturali, ciascuno coronato da una specie di volta massiva a padiglione con falde rettilinee coi quali l'architetto aveva articolato con grande razionalità e sapienza la galleria, furono sostituiti con più riprese di vòlta a botte, tutte con generatrice parallela alla fronte sul Foro. In tempi diversi si aggiunse sulla verticale della galleria (che in origine fu forse coperta a terrazza), e quindi sull'appiombo dell'imposta esterna della volta a botte, il corpo di fabbrica come lo vediamo oggi.

Non è difficile immaginare il sovvertimento profondo che si verificò nell'equilibrio statico dell'organismo. Tanto più se si pensa che, almeno a partire dal XIV secolo, coloro che sopraelevarono il *Tabularium* fecero affidamento sulla grande scarpata di terreno di riporto che si andava accumulando ai piedi del Campidoglio da questo lato, e che formava con la sua forza di inerzia un solido contrafforte alle costruzioni del Palazzo Senatorio. Esigenze archeologiche unidirezionate portarono nel secolo scorso all'asportazione di questa massa di terreno ormai costipato da secoli, e provocarono quindi un ancor più grave squilibrio, accentuato ulteriormente negli anni Quaranta dalla riapertura di due archi della struttura originaria che indebolirono maggiormente la parete, su cui aveva finito per scaricare la volta a botte impostata sulla galleria. Se aggiungiamo altri scavi nell'interno dei cassoni di fondazione nel Medioevo e in età moderna o nell'immediato intorno (Tempio di Veiove), c'è da chiedersi come mai il Palazzo Senatorio sia ancora in piedi.

2.5. Doppia vita dell'edificio

La vita di una struttura edilizia può essere divisa in due segmenti: uno precedente il collaudo e l'altro seguente.

Il primo segmento (vita di cantiere), è di norma brevissimo, rispetto al secondo, anche quando la costruzione sia durata molto a lungo. Il secondo (vita funzionale) comprende tutte le vicende successive, incluso il suo stato di rudere. Solo in rari casi (distruzioni improvvise e totali) può accadere che la vita di cantiere sia più lunga di quella funzionale.

Riconoscere i segni del cantiere è fondamentale perché la loro corretta lettura eviterà di attribuirli a fasi precedenti, oppure di assegnare a interventi costruttivi diversi le tamponature di varchi lasciati nelle strutture per comodità di passaggio durante la costruzione, le fosse per lo spegnimento della calce, i truogoli per l'impasto ecc.

2.6. Deformazioni dovute all'escursione termica

Le variazioni di temperatura provocano sempre dilatazione nelle murature: le esperienze fatte hanno dimostrato che anche quelle giornaliere si trasmettono fino all'interno di grandi masse murarie, purché, s'intende, collocate all'aperto (come nel caso dei ponti, degli acquedotti, delle grandi cortine murarie difensive ecc.).

Ad esempio, un parapetto spesso 0,30/40 esposto su entrambi i lati, con un abbassamento della temperatura della massa muraria pari a 20 gradi subisce un accorciamento di m 0,002. Il che basta a provocare una lesione trasversale che su muri molto lunghi si ripete con cadenza variabile tra i 5 e i 10 m. Queste lesioni, caratterizzate dall'avere i bordi sullo stesso piano, non coinvolgono le fondazioni che, interrate, sottostanno a un diverso regime termico.

Per molte grandi strutture antiche, come, ad esempio, i recinti dei Fori Imperiali o dei complessi termali, che con le loro vaste superfici erano particolarmente esposti a tali sollecitazioni, si dovette affrontare questo problema fin dallo stato progettuale, per molte altre si dovette farlo dopo. A titolo di esempio il muro di spina del cosiddetto Pecile di Villa Adriana, lungo m 214, esposto completamente dopo l'abbattimento dei portici laterali che lo proteggevano, ha subito lesioni di questa natura con cadenze ricorrenti da 11 a 14 m. Va tenuto presente che la struttura è in pratica priva di fondazioni, essendo direttamente poggiata sul banco di tufo.

A parità di problemi, le soluzioni dovevano cambiare a seconda della tecnica muraria impiegata; per esempio, gli accorgimenti adatti per l'opera quadrata non erano applicabili al calcestruzzo. Nella prima il gran numero di giunti verticali insieme coi piani di giacitura orizzontali, vere e proprie superfici di scorrimento in caso di dilatazione, svolgevano un ruolo positivo. Né il sistema di ingrappature e imperniature metalliche che legava i blocchi si opponeva a questi movimenti: anzi, la duttilità del piombo che fissava le grappe e i perni consentiva i piccoli movimenti funzionando da ammortizzatore. Supponendo che la struttura fosse realizzata in inverno, si doveva considerare che nella stagione calda i blocchi si sarebbero dilatati a danno dei giunti (e allora bisognava prevedere un certo spazio) mentre il contrario si sarebbe verificato costruendo d'estate. Mettendo in opera i blocchi coi giunti ampi bisognava fare attenzione che non vi cadessero dentro schegge, anche piccolissime, o comunque materiali non compressibili, che avrebbero causato fessurazioni nei blocchi contigui durante il periodo di dilatazione positiva.

Le caratteristiche del calcestruzzo imponevano di ricorrere a soluzioni differenti come quella di evitare lunghe pareti scoperte oppure, quando non se ne poteva fare a meno, di articolarle con nicchie, esedre, absidi, o comunque vuoti capaci di spezzarne l'unità innervando il muro o frazionando le tensioni. Anche lo spessore della parete serviva per contrastare questo tipo di lesioni in base al principio per cui tanto maggiore è la massa muraria, tanto minore è il risentimento da escursione termica. Non si poteva però esagerare nello spessore, per ovvi motivi economici e per non incorrere nell'inconveniente delle lesioni, anche considerevoli, causate dal ritiro delle malte.

Il Baggi (1926, p. 198) riporta esempi significativi dell'effetto della variazione termica sulle murature ordinarie: nel grande viadotto di Gournoir (60 m di luce) nell'inverno 1889-90 si ebbe una contrazione che provocò una discesa della chiave di 10 mm, compensata nell'estate seguente da un parziale reinnalzamento di 3 mm e nell'inverno successi-

vo, per abbassamento della temperatura di 20 gradi, si constatò un'ulteriore discesa di 12 mm.

Fino a qualche decennio fa, quando ancora si costruiva con tecniche tradizionali, a evitare questi inconvenienti si sconsigliava di realizzare volte esposte con una sezione in chiave inferiore a m 0,30 (senza considerare il riempimento superiore). È raro che i romani siano scesi sotto i 0,45 m. Un esempio degli effetti della dilatazione termica nelle strutture in pietra si ha nella Colonna Traiana, come hanno chiaramente dimostrato le lesioni visibili nei rocchi marmorei non dovute a scosse sismiche, come nel caso della Colonna Antonina, ma alla sollecitazione termoelastica (Gallo Curcio, Iacobelli, 1986).

3

Coperture

3.1. Il sistema non spingente

Comprende tutte le strutture capaci di scaricare pesi (o tensioni) secondo risultanti prossime alla verticale. Si tratta quindi dello *schema architravato*, con tutte le relative connessioni purché in grado di trasmettere i carichi verticalmente (solai, tetti a capriata o carpenteria assimilabile, mensole ecc.).

La sollecitazione, come s'è detto, risulta a *compressione* per gli elementi verticali (colonne, pilastri ecc.) e a *pressoflessione* per quelli orizzontali (architravi, pareti ecc.).

3.1.1. Schema trilitico

È la struttura elementare composta da due sostegni verticali (ritti, pilastri, piedritti ecc.) e una traversa sovrapposta (giogo, architrave). Siccome la traversa è un solido vincolato ad appoggio semplice sollecitato verticalmente dal proprio peso e da quello della struttura soprastante, si ha una deformazione (o una tendenza alla deformazione) che pone la sezione superiore della traversa in *compressione* e quella inferiore in *trazione*; in mezzo un *asse neutro* (fig. 3.1 dis.1). Così un'eventuale lesione avrà andamento *normale all'asse geometrico e aperta in basso.*

Nell'edilizia antica l'architrave, nel senso della lunghezza, era composto di un solo pezzo di materiale più o meno elastico (legno, o una delle tante pietre da taglio) mentre i piedritti potevano essere realizzati con vari elementi anche di differenti materiali (conci di pietra, tufo, muratura, legno ecc.).

L'architrave sopporta il peso proprio e quello di parte della struttura soprastante e lo convoglia, con andamento pressoché verticale, sui piedritti e sulle fondazioni che provvedono a ripartirlo sul piano fondale. In questa funzione esso è normalmente soggetto a *flessione*, ma può esserlo anche a *compressione* e a *taglio.*

Proprio per la sua semplicità quello trilitico è il più antico e diffuso dei sistemi costruttivi. Nell'area mediterranea, soprattutto nelle grandi costruzioni, spesso l'architrave era composto di due o più elementi di pietra affiancati per taglio (fig. 3.1 dis. 3). Questo per facilitarne il trasporto e il montaggio, perché i vuoti dei giunti attenuavano l'effetto del-

la dilatazione termica, e per avere una risorsa statica nell'eventualità che uno degli elementi, difettoso, si fosse rotto.

Nell'architettura greca e romana l'architrave è il più basso dei tre elementi che compongono la *trabeazione* (gli altri sono nell'ordine: *fregio* e *cornice*): questo dal punto di vista formale. Molto spesso però la forma non trova riscontro nella funzione resistente che è affidata a un blocco unico, la cui faccia esterna è distinta in basso come architrave e in alto come fregio. La cornice normalmente è un elemento a se stante (fig. 3.1 dis. 2).

CARICO CHE GRAVA SULL'ARCHITRAVE/ARCO NATURALE

La parte della membratura che grava sull'architrave non corrisponde all'intera struttura che insiste sulla sua verticale, ma è limitata al prisma triangolare di superficie laterale pari al triang lo equilatero che ha come base la luce dell'architrave stesso. Eventuali solai compresi pesano solo per la porzione che ricade nel prisma (fig. 3.1 dis. 4).

Questo fenomeno è intimamente connesso con quello dell'*arco naturale* il cui profilo resta delineato dalla lesione (o crollo) ad andamento parabolico che si verifica nella struttura coinvolta in un cedimento verticale delle fondazioni. In questo caso la parte di muratura posta al di sopra della lesione non è trascinata nel dissesto. Il fenomeno si verifica sperimentalmente costruendo un muretto di mattoni a secco su un tavolato montato su cavalletti. Asportando il settore intermedio del tavolato si avrà un crollo con profilo superiore parabolico simile per volume a quello del prisma triangolare di cui si è parlato sopra.

L'indeterminatezza del profilo della parabola di distacco dipende dall'omogeneità della struttura, dall'isotropia, dalla capacità di resistenza, dalle modalità del cedimento ecc. La volontà di superare la casualità della lesione portò ben presto a inserire nel muro in corrispondenza dei punti deboli (aperture, fogne, "salti" tra fondazioni di maggiore resistenza ecc.) un arco di scarico (sordino) con lo scopo preciso di direzionare l'andamento delle sollecitazioni.

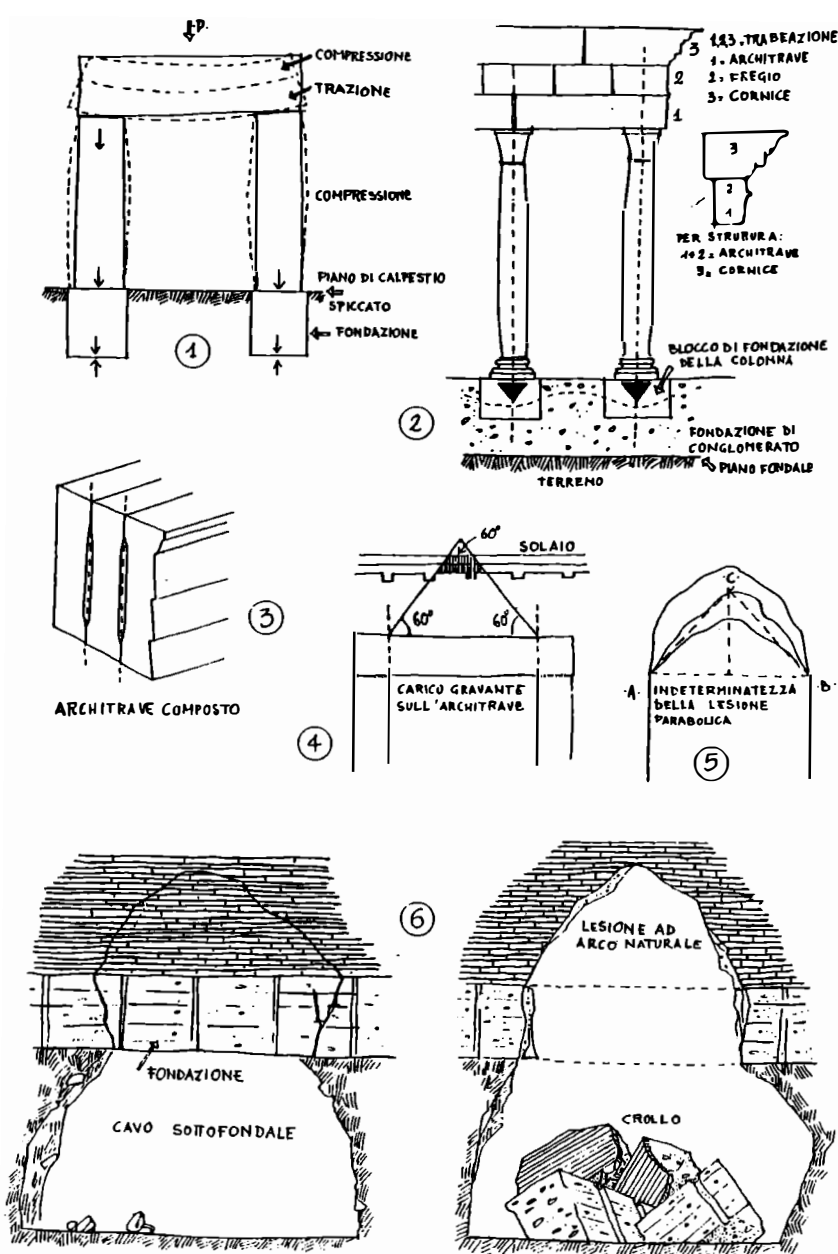
Vitruvio (6, 8, 3) conosce bene il fenomeno:

> dobbiamo anche cercare di alleviare il peso della muratura per mezzo di archi [...] perché quando questi [...] sono prolungati oltre le travi o gli architravi, per prima cosa il legno sollevato dal carico non si fletterà, e poi, se deperisse nel tempo sarebbe facile sostituirlo senza bisogno di puntelli.

Dal testo risalta anche l'intento di lasciarsi la strada aperta a una facile manutenzione che poteva consistere nella semplice sostituzione della trave o anche dell'asportazione e ricostruzione dell'intera lunetta compresa tra la trave e l'intradosso del sordino.

Il legno fu il materiale da costruzione di gran lunga più usato nell'antichità. Anche oggi del resto lo è: basti pensare che, anche escludendo quello da ardere, si consuma attualmente, trenta volte in volume e due volte in peso, più legno che acciaio.

È facile dunque immaginare il ruolo che esso ha avuto nelle opere

FIGURA 3.1
Schemi strutturali

provvisionali (ponteggi, centine, sbadacciature ecc.) e nelle costruzioni vere e proprie (travature, architravi, coperture, solai, consolidamenti fondali ecc.).

Poiché il legno ha fibre parallele, la sua resistenza meccanica dipende dal verso della sollecitazione. Esso resiste infatti assai male alla compressione applicata nella stessa direzione delle fibre, mentre regge molto bene alla trazione esercitata nello stesso senso (fig. 3.2 dis. 2).

Questo ha fatto da sempre del legno un materiale particolarmente adatto all'edilizia in generale, e allo schema costruttivo trilitico in particolare. Ma la deperibilità e la tendenza alla deformazione plastica fecero presto preferire la pietra e il marmo, anche per una intrinseca maggiore preziosità del materiale.

Data la fragilità dell'architrave lapideo si è sempre cercato di proteggerlo con speciali accorgimenti quali l'arco di scarico (cfr. par. 3.2.1), o, quando questo non era realizzabile, sovrapponendo un secondo architrave distanziato dal primo di un certo spazio, se non addirittura una *piattabanda di scarico* (fig. 3.2 dis. 1).

Nel caso di architravi disposti in serie per garantire la maggiore stabilità si facevano cadere i giunti sull'asse mediano dei piedritti in modo che fosse garantita la maggiore stabilità (fig. 3.2 dis. 5); diversamente un architrave isolato poteva non solo occupare con le estremità l'intera sezione superiore del piedritto, ma anche oltrepassarla (fig. 3.2 dis. 5).

Raramente poteva anche accadere che architravi di marmo fossero congiunti a baionetta al centro dell'intercolumnio, purché naturalmente non fossero troppo sollecitati (cfr. Ostia, Terme del Foro, fig. 3.2 dis. 4).

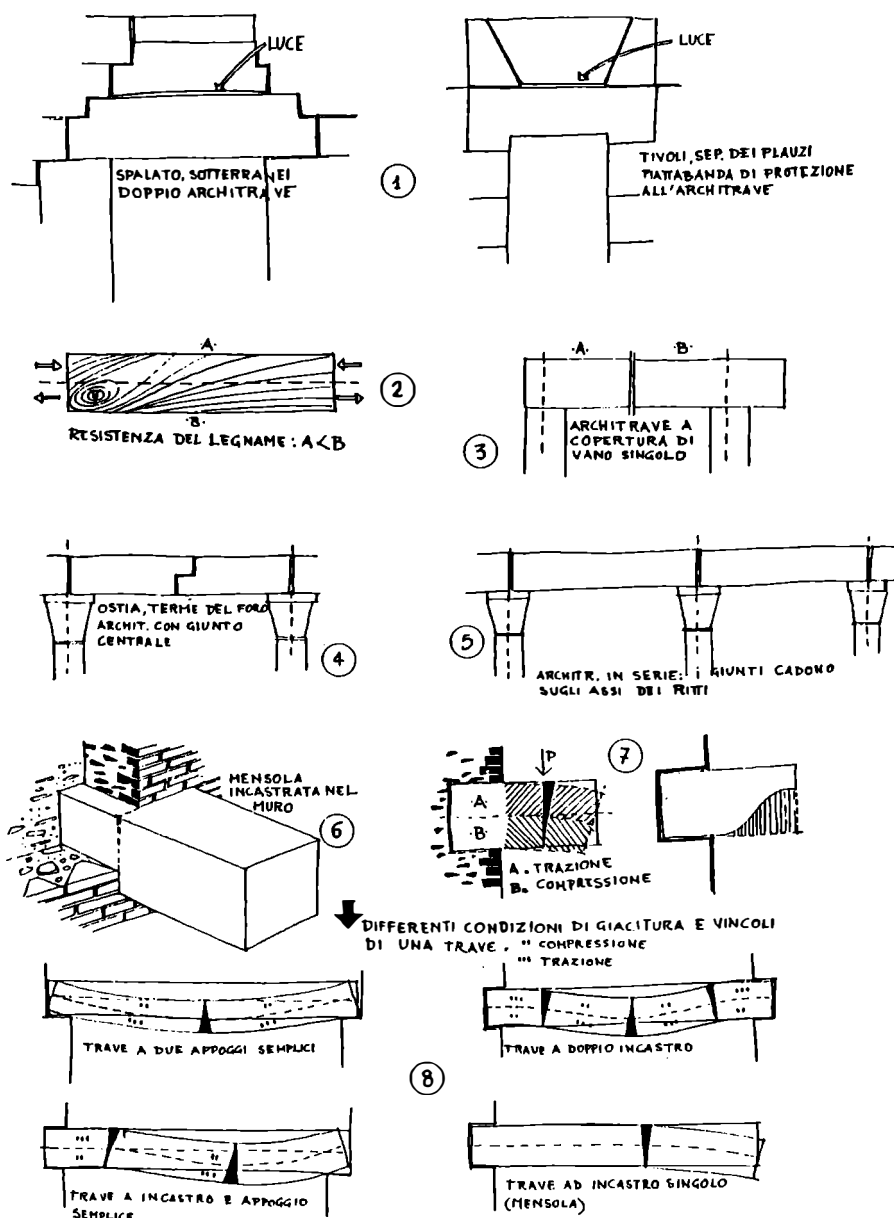
3.1.2. La mensola

La mensola, o, più correttamente la *trave a mensola*, è un solido rettilineo con giacitura orizzontale collegato da una sola estremità alla parete per un vincolo ad incastro (fig. 3.2 dis. 6). Così essa è in grado di reagire praticamente con la stessa efficacia alle tre libertà di movimento ammesse per ogni solido posto su un piano secondo lo schema del lavoro a *flessione*.

Siccome, però, normalmente la sollecitazione ha andamento verticale dall'alto, si ha la tendenza della mensola a deformarsi come nella figura 3.2 dis. 7. Così, la sua metà superiore sarà in trazione, quella inferiore in compressione e al centro si avrà l'asse neutro (esattamente il contrario di quanto avviene nell'architrave). Un'eventuale lesione sarà pertanto *normale all'asse geometrico e aperta in alto.* Nel caso in cui la mensola fosse sollecitata da un carico concentrato al baricentro, si avrebbe lo scorrimento di due sezioni trasversali contigue con l'effetto di lavoro a *taglio.*

3.1.3. Pseudo arco (o arco a mensola) e pseudo cupola

Il concetto formale di arco è noto, ma, come vedremo più avanti, per definire un arco non basta dire che si tratta di una struttura curva impo-

FIGURA 3.2
Architravi e travi

stata su due piedritti messa a coprire un vano. Se così fosse si potrebbero considerare tali anche le strutture rappresentate alla figura 3.3 dis. 1 che invece, per quello che riguarda il procedimento costruttivo e la disposizione degli elementi, sono profondamente differenti. È per questo che si parla piuttosto di *pseudo archi* o *archi a mensola*. Per la semplicità di concezione essi si incontrano in tutte le culture e in ogni epoca, anche in ambienti in cui non è legittimo ipotizzare interferenze culturali, come gli archi a mensola dell'architettura maya o degli iglù eschimesi che nella concezione strutturale sono identici alle *tholoi* greche o a quelle etrusco-italiche.

In qualche caso, soprattutto quando lo pseudo arco è di luce molto ridotta, si ha quasi l'impressione che si tratti semplicemente di un architrave di grossa sezione scavato ad arco nella sua parte inferiore. Esso, se monolitico, lavora piuttosto come la combinazione di un architrave centrale e due mensole laterali. Lo scarico delle forze rimane prevalentemente verticale. Tuttavia possono verificarsi dei casi complessi in cui interagiscono comportamenti che ricordano il fenomeno dell'arco naturale (cfr. par. 3.1.1) e quello dell'arco vero e proprio (cfr. par. 3.2.1) in una viscosità di reazioni difficile da delimitare con esattezza. Qualche volta a causa di fratture diversamente dislocate si verifica addirittura il passaggio dallo schema non spingente (trilitico) a quello propriamente spingente (arcuato) (cfr. figura 3.3 dis. 2).

Per tutte queste ragioni, lo pseudo arco è molto vicino all'arco reale o almeno a quello naturale.

Il comportamento schematico della pseudo cupola è lo stesso dello pseudo arco. Si tratta di blocchi squadrati sovrapposti per cerchi concentrici di diametro decrescente così che ognuno aggetta sull'inferiore fino a chiudere il tutto con un solo blocco. Le riseghe interne venivano lasciate, oppure erano scalpellate via come succedeva anche per l'arco (fig. 3.4 diss. 1, 2). A volte la stabilità era affidata anche a un pilastro centrale che teneva il blocco di sommità.

La stessa disposizione a cerchi concentrici conferiva stabilità a ogni singolo anello limitando di molto le possibilità di ribaltamento e facendo assimilare il tutto a una cupola naturale.

3.1.4. La carpenteria lignea

Con questo termine indichiamo ogni forma di attività costruttiva in legno, dal ponteggio per l'edilizia alla cantieristica civile e militare.

La struttura lignea fu impiegata tanto nel sistema trilitico quanto in quello arcuato (basti pensare alle centinature del ponte sul Danubio di Apollodoro di Damasco). Quasi sempre, però, essa dovette restare nel sistema non spingente.

Numerose fonti letterarie trattano questo tema ma ci sfuggono sempre il dettaglio costruttivo, le modalità di accostamento dei diversi elementi e spesso anche il vero significato dei termini usati. L'alto livello raggiunto dalla carpenteria è provato dalle fonti letterarie, tra cui si ricordano quelle relative alle torri che Demetrio Poliorcete eresse nel 306

FIGURA 3.3
Pseudo arco e pseudo cupola

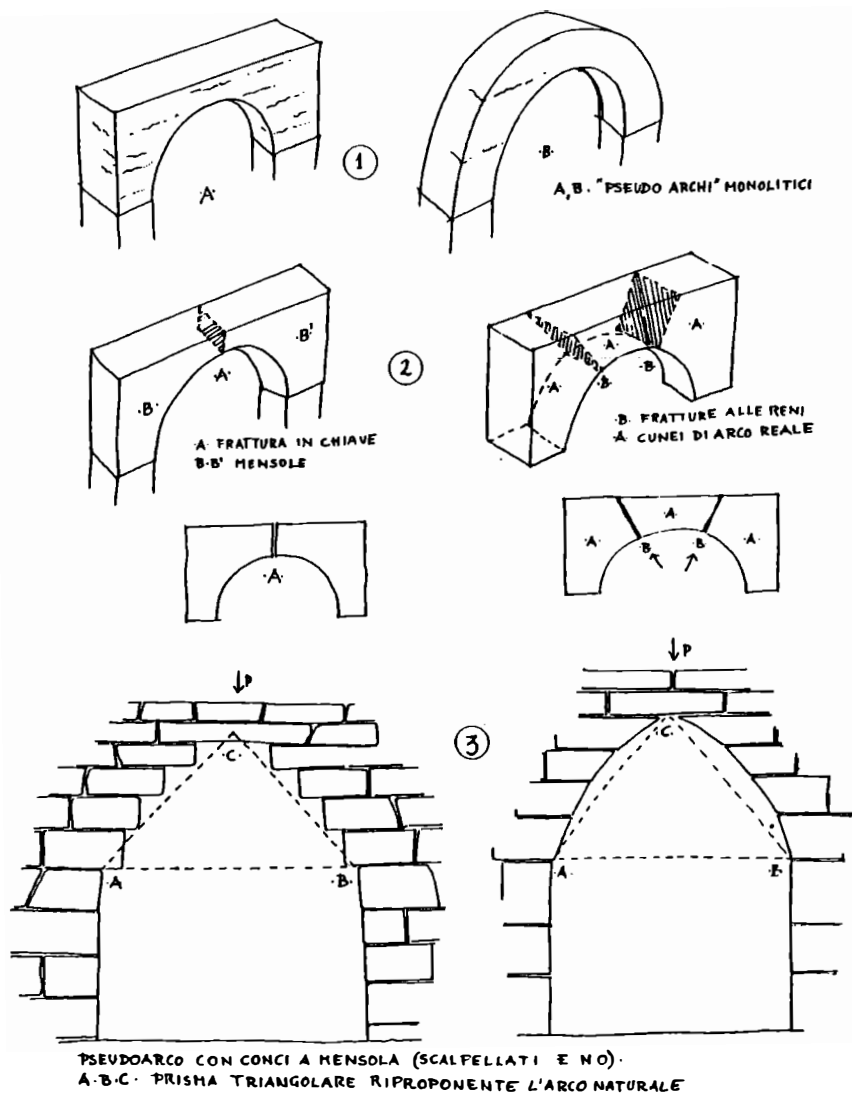
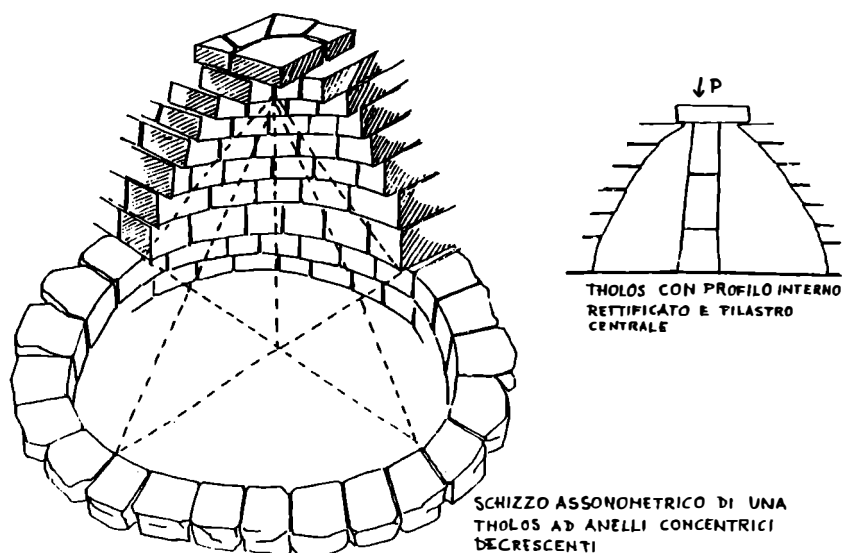



FIGURA 3.4
Pseudo cupola

a Salamina di Cipro (Diod., 20, 48, 2-3: base quadrata di 20,80 m per un'altezza di 41,50, impostata su 4 ruote di m 3,70) e nel 304 a Rodi (Diod., 20, 85, 1; 88, 7). Quest'ultima venne montata a terra dopo un tentativo fallito di attacco dal mare con 4 torri erette su natanti collegati, distrutti da una tempesta, e aveva base quadrata di m 23,10 per un'altezza di 41,60 (secondo Aten., *Mech.*, p. 27, l. 2.6) o di 30,52 (per Plut., *Dem.*, 21, 1-2). Le misure che di essa dà Vitruvio (10, 16, 4) pari a m 17,76 di base per 37 di altezza per un peso complessivo di poco inferiore alle 120 tonnellate, per quanto considerate false per errore del copista (Garlan, 1974, p. 132), sembrerebbero tuttavia le più plausibili.

La torre, formata da 9 ripiani con scale doppie a scendere e salire veniva mossa su 8 ruote cerchiate di ferro spesse quasi 1 m e munite di un dispositivo che ne rendeva possibili anche i movimenti laterali. I tre lati esposti al nemico erano rivestiti di lastre metalliche; per la manovra erano necessari, a quanto sembra, 3.400 uomini. Contingenti così numerosi preposti alla manovra delle grandi macchine belliche non erano del tutto insoliti: si pensi ai 6.000 uomini che manovravano l'ariete di Censorino a Cartagine durante la III guerra punica (Appian., *H.R.*, VIII, 14, 98).

Un altro esempio è la struttura voluta da Curione nel 50 a.C. composta di (Plin., *N.H.*, 36, 34, 117):

due vasti teatri poggianti su piattaforme rotanti indipendenti; da essi – dopo la rappresentazione antimeridiana fatta quando erano contrapposti in modo che le scene non si ostacolassero a vicenda – facendoli girare su se stessi [...] anche con alquanti spettatori, si otteneva un anfiteatro ricongiungendo le estremità delle cavee.

E, ancora, l'obelisco collocato nel Circo Massimo da Costanzo II nel 357. Varrà la pena di riportare il passo di Ammiano Marcellino (17, 4, 14-15): l'obelisco

fu trasportato lungo il canale del Nilo ed approdò ad Alessandria; lì fu costruita una nave di dimensioni fino ad allora sconosciute, spinta da 300 remi.

Arrivato a Ostia fu fatto risalire con grandi difficoltà lungo il Tevere

fino al Vicus Alexandri distante tre miglia dalla città. L'obelisco fu messo poi su slitte e con grande attenzione lo si fece passare per la Porta Ostiense e attraverso la *Piscina Publica* [= la *regio XII*] fu portato al Circo Massimo.

Per alzarlo

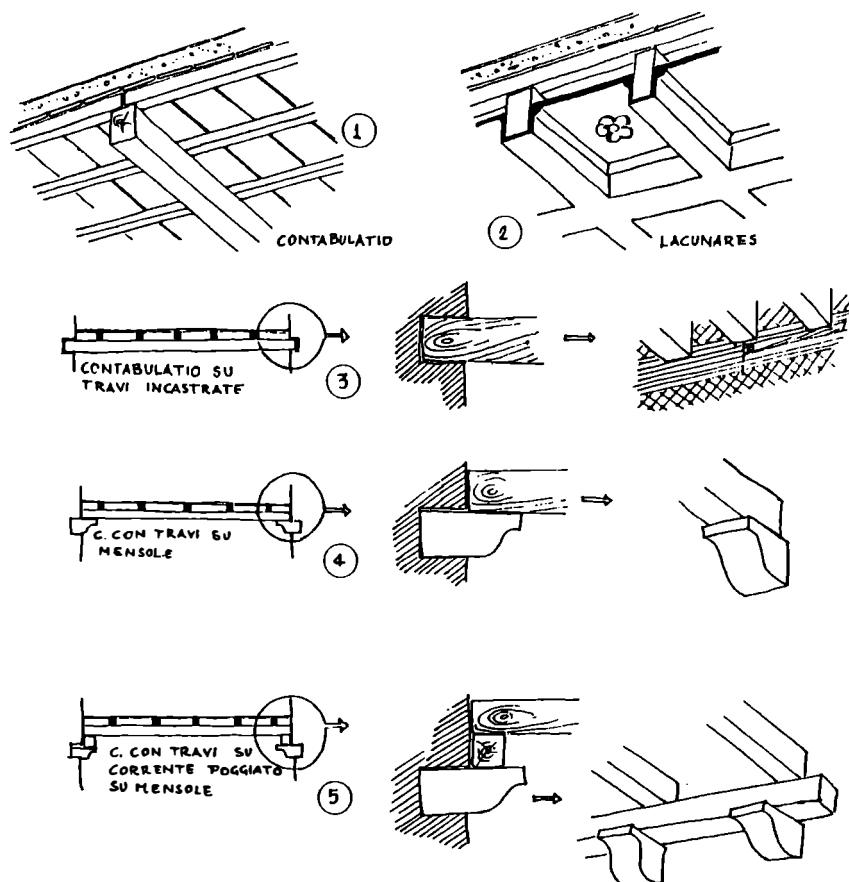
si portarono e sollevarono un gran numero di travi, a cui si appesero lunghe e pesanti funi che con il loro gran numero sembravano una fitta rete che nascondeva il cielo. Ad esse fu legata quella vera montagna coperta di figure scolpite e gradualmente fu sollevata in alto, in sospensione e, dopo essere rimasta appesa per un certo tempo, mentre molte migliaia di uomini giravano ruote simili a macine [gli argani orizzontali] fu finalmente collocato al centro del circo.

Si tratta dell'obelisco tebano di Thutmosis III, il più alto di Roma (m 32,50), che Sisto IV trasferì nel 1587 a S. Giovanni in Laterano.

Per avere un'idea concreta della complessità di questi macchinari basterà rifarsi all'affresco della Biblioteca Apostolica in Vaticano, che, preceduto da una serie di stampe a illustrazione dell'impresa, ricorda il trasporto dell'obelisco di piazza San Pietro nel 1596. Per una rappresentazione antica si veda il rilievo su due lati contigui del dado di base dell'obelisco di Teodosio a Costantinopoli del 390 e la relativa iscrizione che ricorda l'impresa.

Legati alla tecnologia meccanica sono anche i trasporti speciali. Le fonti ne citano diversi, tra cui ricordiamo quello del colosso di Nerone che Adriano affidò all'architetto Decriano. Esso fu mosso «in verticale senza coricarlo, dal posto dove è adesso il tempio di Venere e Roma. Fu un'impresa memorabile per la quale, tra le altre cose, furono utilizzati 24 elefanti» (*H.A.*, Hadr., 19, 12-13).

Dunque non ci sono dubbi sull'eccezionale sviluppo che ebbe nell'antichità la carpenteria lignea legata alla meccanica ma proprio la già accennata mancanza di specifiche descrizioni tecniche e di terminologie adeguate ci lascia nell'incapacità sostanziale di accettare anche le più semplici soluzioni, e conduce a veri e propri paradossi negli studi archeologici. D'altra parte che la meccanica fosse una disciplina basilare

FIGURA 3.5
Il solaio

nella formazione degli architetti è noto; si pensi al X libro di Vitruvio come al taccuino di Villard de Honnecourt (sec. XIII).

3.1.5. Il solaio ligneo

Il solaio oggi individua genericamente il diaframma orizzontale tra due piani. Il termine *solarium*, da cui deriva, designava la copertura piana, a terrazza (cfr. latino medievale *domus solariata* in opposizione alla *domus scandulicia*, quella provvista di scandole, cioè le tegole di legno). Il diaframma intermedio a due piani veniva definito *contabulatio, conti-*

gnatio ma la struttura non differiva molto in entrambi i casi. Essa veniva applicata anche ai portici (Pompei, Ercolano, Ostia, Villa Adriana ecc.) e il suo uso è confermato dalle fonti letterarie tanto per il mondo greco che per quello romano. Vitruvio (5, 1, 1-3):

> I Greci sono soliti fare le piazze di pianta quadrata decorandole con colonnati fitti provvisti di architravi di pietra o di marmo e sopra fanno un piano di calpestio con travatura di legno. Nelle città italiche invece non si può fare la stessa cosa perchè c'è la tradizione, trasmessaci dagli avi, di tenere spettacoli gladiatori nel foro. Pertanto tutt'intorno ai loggiati si debbono costruire intercolumni di luce più ampia e torno torno, sotto i portici, porre le botteghe dei cambiavalute mentre sul piano superiore si debbone fare i balconi; le une e gli altri vanno disposti nel modo più funzionale anche per facilitare le contribuzioni pubbliche.

Naturalmente la *contignatio*, data l'elasticità del legno, era adatta a coprire luci considerevoli e si prestava a variazioni sul tema e a virtuosismi decorativi.

Anche in antico si usavano gli stessi tipi di solaio che sono giunti fino a noi: quello semplice ancora visibile in molte vecchie case (*contignatio* e la versione ricca, il cassettonato (*laquear, lacunar*). Plinio (*N.H.*, 31, 186) fa cenno a travature incrociate: «*binas per diversum coaxationes substerni*» (fig. 3.5 diss. 1, 2).

Dalla letteratura antica, oltre naturalmente che dai resti conservati o ricostruibili con certezza, sappiamo che il solaio poteva avere il pavimento superiore di semplici tavole, oppure, più spesso, una pavimentazione in muratura in tutto simile a quella sovrapposta alle volte e di spessore considerevole (cfr. par. 6.1).

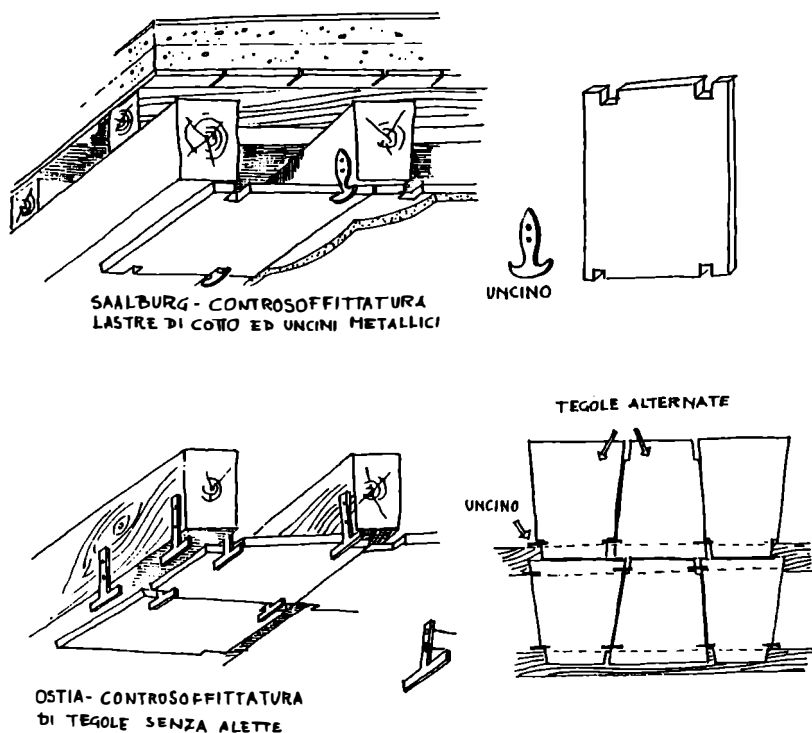
Diverso è il caso dei cassettoni mobili citati per le sale delle dimore di lusso: si trattava di meccanismi coi quali si cambiava decorazione a ogni portata, o attraverso cui si facevano scendere profumi, fiori, corone sui commensali (cfr. Senec., *Epist.*, 115, 9, 10; Suet., *Nero*, 31; Petron., *Satyric.*).

In questi casi si trattava di soffittature al di sopra delle quali esisteva un vano (sottotetto o mezzanino non sappiamo) praticabile dalla servitù.

Del resto l'uso di controsoffittature per mascherare la grossa orditura del tetto dovette essere molto diffuso sia nell'antichità classica che in quella tarda.

Il Giovenale durante lavori di restauro trovò prove certissime dell'esistenza di soffittature in piano in S. Maria in Cosmedin, SS. Nereo e Achilleo, S. Prassede, S. Giovanni a Porta Latina (cfr. *Enc. Ital.*, voce *soffitto*). Ciò fa pensare che all'inizio le basiliche fossero generalmente munite di questo elemento per schermare le capriate e che solo col deperimento del legname si siano abolite passando a decorare direttamente l'intradosso del manto del tetto.

In età classica erano diffusi entrambi i sistemi principali di vincolo della grossa orditura del solaio: quello a incastro con le travi collocate in appositi alloggiamenti a parete, spesso (ma non sempre) previsti durante la costruzione, e quello ad appoggio semplice con le mensole di pietra

FIGURA 3.6
Controsoffittature

per la trave corrente di sostegno al resto dell'orditura (fig. 3.5 diss. 3, 4, 5). Talvolta nelle costruzioni di grosso impegno, quando le travature incastrate erano molto fitte, venivano poggiate su un corrente continuo alloggiato orizzontalmente nella parete per meglio ripartire il carico. In qualche caso esso si conserva ancora (cfr. palazzo centrale a Villa Adriana).

Il Giovannoni (1925, p. 73) sostiene che il sistema preferito era quello a mensole mentre la realtà archeologica propone una frequenza di gran lunga maggiore per la soluzione a incastro nella parete. Semmai si può dire che l'uso delle mensole sembra essere particolare dei locali terreni per lo più destinati a magazzini o taberne. In qualche caso la presenza di una assise di blocchi aggettanti per l'intera lunghezza della parete farebbe pensare a una specie di mensola continua anche se non si può escludere (cfr. le taberne del Foro di Cesare o quelle della insula dell'Aracoeli, e tanti palazzi ostiensi), che si sia trattato dell'appoggio di una volta ribassatissima oggi perduta.

Dei soffitti ci parlano anche: Vitruvio (7, 1, 1 ss.), Plinio (*N.H.*, 35, 7, e 36) e Isidoro (*Orig.*, 19, 12).

3.1.6. Le controsoffittature

Si hanno diversi esempi di controsoffittature in intonaco e stucco su incannucciata o stuoia di canne sostenuta da leggera intelaiatura lignea, o laterizi fissati alla *contignatio*. Questo espediente era molto usato per abbassare i soffitti troppo alti, specialmente quelli dei *cubicula* (camere da letto) normalmente di dimensioni ridottissime rispetto alla media degli altri ambienti della casa (fig. 3.6).

Naturalmente la tecnica usata, per la deperibilità delle componenti e la leggerezza del sistema, ha lasciato scarsissime tracce e per di più di difficile lettura, se escludiamo i casi del tutto particolari di Pompei ed Ercolano.

3.1.7. La copertura a terrazza

Sappiamo che anche nell'antichità si costruivano terrazze (*solaria*) su travature di legno: ce lo attestano gli alloggiamenti di travi specifiche conservati (Villa Adriana, Ostia, Pompei, Ercolano ecc.), i resti di massi pavimentali relativi delle terrazze (per una particolare ipotesi a questo proposito cfr. Salza Prina Ricotti, 1988) e le fonti letterarie.

Vitruvio (7, 1, 2) ci informa:

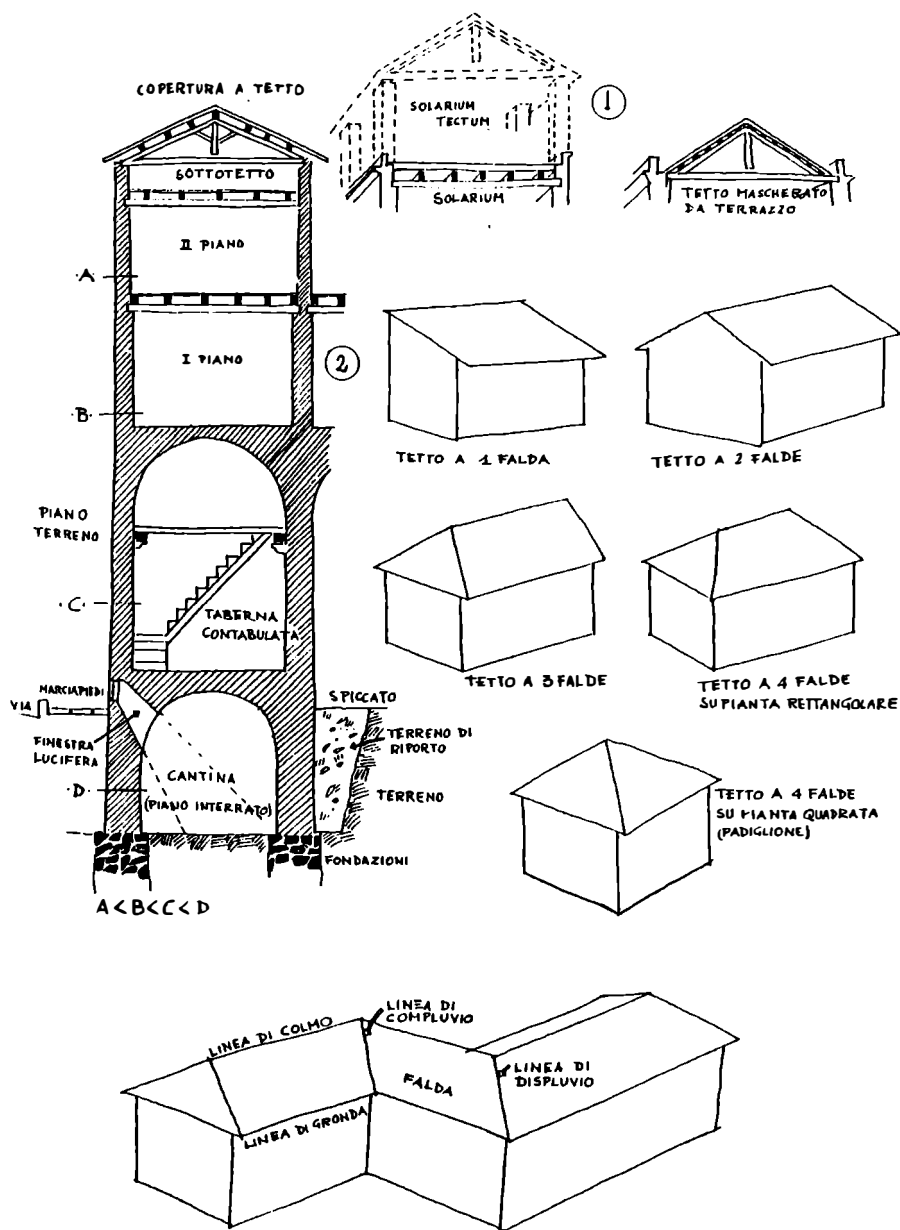
> Si deve porre particolare cura nei pavimenti a cielo aperto, perchè i solai, gonfiandosi per l'umidità o diminuendo di volume per la secchezza o abbassandosi per le flessioni, muovendosi, provocano guasti ai pavimenti, inoltre non sopportano con integrità le gelate e le brinate. [Cfr. par. 6.1].

Esisteva anche la versione coperta della terrazza (*solarium tectum*; fig. 3.7 dis. 1).

Gli elementi che ci permettono di riconoscere l'originario impiego della terrazza sono: la cadenza ravvicinata dei fori da trave (assai più fitta che nelle coperture a tetto) e la disposizione su una sola fila orizzontale, la presenza di accessi a livello superiore ai fori da trave e dei discendenti per lo smaltimento dell'acqua piovana. Non è determinante invece la presenza della scolina a terra, sull'appiombo della presunta linea di gronda, che spesso invece viene assunta come prova del tetto a doppio spiovente. Essa si poteva trovare naturalmente anche quando una costruzione, per esempio un portico, era coperto a terrazza con inclinazione all'esterno.

3.1.8. Copertura lignea a falde spioventi

È una struttura compresa nei sistemi non spingenti perché vi si adottavano tutti gli accorgimenti necessari per eliminare le spinte oblique. La regola era che nessuna trave spingesse contro i muri, ma l'insieme for-

FIGURA 3.7
Copertura a tetto

masse una macchina che pesasse verticalmente. Il tetto a doppio spiovente, anche se certamente più antico, non è usato in opposizione alla volta, anzi, in molti casi vi si associa nell'edilizia pubblica e in quella privata secondo una tecnica che, obbedendo alle leggi della statica elementare e a quelle dell'economia, è stata in uso fino ai nostri giorni. Così, mentre nei piani inferiori si adoperava la struttura voltata, in quelli superiori i solai di legno e nella copertura tetti o terrazze (fig. 3.7 dis. 2).

Il Giovannoni pensò che i Romani applicassero il tetto nei vecchi temi architettonici (basilica, tempio, sale principali dei palazzi, *tablina, oeci* ecc.), mentre in quelli nuovi, più strettamente legati alla creatività romana (terme, *horrea*, ninfei, teatri ecc.), ricorressero alla volta. Un'ipotesi, questa, smentita dalla realtà archeologica: infatti ci sono templi e basiliche coperti a volta, e terme e magazzini coperti a tetto. E poi bisognerebbe dimostrare che il tema della basilica sia più antico di quello degli *horrea*

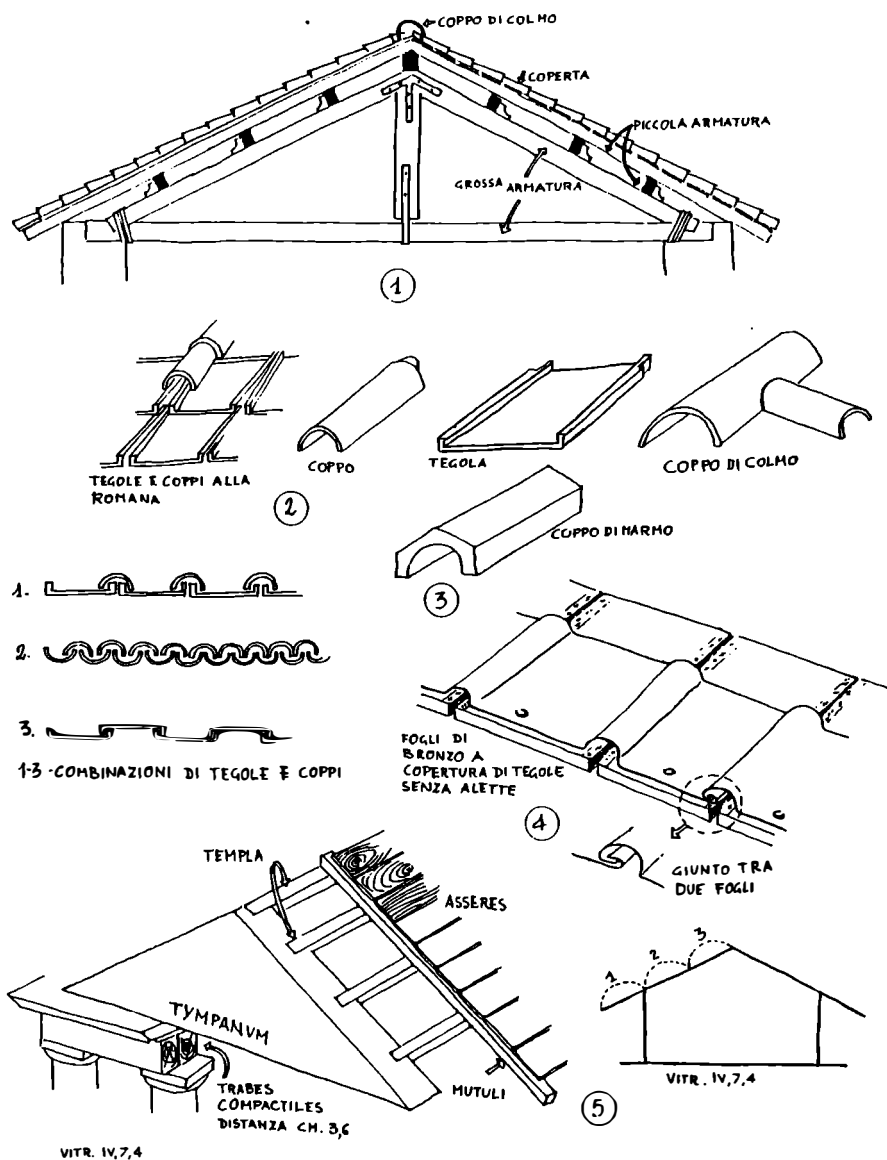
In sostanza nella storia dell'edilizia ci fu un intenso scambio tra tema funzionale proposto e soluzione strutturale adottata; questo in rapporto a tutta la complessa serie di condizionamenti a cui l'arte del costruire non è mai potuta sfuggire. Vi sono poi temi architettonici, come, per esempio, i ninfei, che, o per la speciale collocazione (spesso erano inglobati in complessi strutturali primari come le sostruzioni) o per doversi assimilare alle grotte naturali, non potevano che ricorrere alla volta massiva.

L'importanza estetica del tetto nel panorama cittadino è troppo evidente per doverne parlare a lungo. Esso, per l'inclinazione all'orizzonte e per il colore, caratterizza fortemente l'architettura di edifici come quella di intere città. Soprattutto in regioni, come gran parte di quelle italiane, in cui il declivio del terreno facilita i punti di vista elevati.

Le funzioni del tetto sono:

a) coprire l'edificio proteggendolo dagli agenti atmosferici;
b) assicurare il deflusso rapido delle acque meteoriche;
c) garantire il rapido prosciugamento;
d) difendere il sottotetto dalle forti variazioni della temperatura esterna;
e) proteggere i muri verticali per mezzo dell'aggetto di gronda. Vitruvio (4, 7, 4), destina a questo scopo 1/3 dell'intera falda, ma si riferisce esplicitamente a edifici sacri molto antichi;
f) costituire un'armatura per il sostegno di apprestamenti interni leggeri estetici (come le finte volte a graticcio degli *oeci*) o funzionali (come le calotte centinate delle sale riscaldate delle terme).

In linea di massima l'inclinazione era tanto maggiore quanto lo erano la piovosità della zona e il coefficiente di attrito del materiale di coperta impiegato. Naturalmente nel conto entrava anche la spinta del vento. L'inclinazione delle falde è documentata dai timpani dei templi, dai fori da trave superstiti sulle pareti (cfr. Foro di Augusto), dagli elementi an-

FIGURA 3.8
Ossatura e rivestimento del tetto

golari delle cornici dei frontoni abbattuti ecc; essa oscillava tra i 18 e i 33 gradi sull'orizzonte.

Per meglio capire le sollecitazioni a cui era sottoposta una copertura lignea a falde inclinate dobbiamo considerare il *carico permanente* e quello *accidentale*. Il primo, escludendo la grossa armatura, può essere così ripartito (il calcolo è per mq): correnti o arcarecci = 12/15 kg; piccola orditura = 15/25 kg; materiale di coperta (tegole normali) = 25/35 kg; con un totale, per mq, oscillante tra i 52 e i 75 kg.

Con uno spessore di neve compreso tra i m 0,40/0,80 il peso per mq varia da 30 a 90 kg; sulla stessa superficie il vento esercita una pressione verticale compresa tra i 20 e gli 80 kg.

Questo alla nostra latitudine, dove l'inclinazione delle falde dei tetti è quella citata; con una maggiore monta delle falde diminuisce la spinta della neve (e dell'acqua) ma aumenta quella del vento. Ne deriva che nelle coperture pesanti, come erano di regola quelle antiche, a seconda del clima e dell'esposizione al carico permanente assai vicino ai 100 kg per mq, si doveva aggiungere quello accidentale che poteva oscillare tra i 110 e i 140 kg per un totale di 210/240 kg a mq.

Dal calcolo sono escluse, oltre la grossa orditura, i rivestimenti speciali come le tegole di bronzo, di solito lamine sottili sovrapposte a quelle normali private delle alette (fig. 3.8 dis. 4), o quelle di marmo (fig. 3.8 dis. 3).

Per resistere a queste sollecitazioni servivano:

— *grossa armatura*: complesso di travi e/o incavallature di legno collocate a distanze uguali e appropriate, così da ripartire omogeneamente il carico rispetto alla lunghezza delle falde. Questi elementi, fatti per lo più di materiale lavorato ad ascia, venivano collocati lungo le linee di colmo, di displuvio, di compluvio e di massima pendenza (puntoni);

— *piccola armatura*: correnti longitudinali (arcarecci), travicelli, correntini, tutto quel legname insomma, per lo più lavorato a sega, destinato a reggere la copertura vera e propria;

— *materiale di coperta*: tegole piane, tegole curve (coppi, canali, embrici), tegole piane + coppi, scandole (di legno), lastre di ardesia, tegole piane e curve di marmo, di bronzo ecc.

La grossa armatura, se priva di capriate, obbligava comunque a provvedimenti per eliminare, o almeno attenuare, le spinte oblique dei puntoni. Questo soprattutto nelle zone angolari dell'edificio, dove era necessario ricorrere alle traverse alloggiate sotto i cantonali (travi d'angolo con posizione diagonale rispetto alla costruzione) come nella figura 3.9 dis. 1.

Per la terminologia delle diverse parti del tetto si vedano le figg. 3.7, 3.8.

Vitruvio (4, 7, 4) così descrive l'armatura del tetto del tempio etrusco italico:

sopra le colonne si devono collocare le travi congiunte insieme [*trabes compactiles* = architrave], dell'altezza che le proporzioni e la grandezza dell'opera com-

porteranno [...] e la giunzione deve essere larga due dita [cm 3,6] perché se le travi si toccano tra di loro e non vengono arieggiate si riscaldano subito e marciscono rapidamente. Al di sopra dell'architrave e delle pareti l'aggetto dei mutuli deve essere pari alla quarta parte dell'altezza della colonna e le lastre di rivestimento si debbono fissare alle loro fronti. Sopra ancora va posto il timpano di muratura o di legno: e su questo vanno collocati il fastigio, il colmareccio, e i travicelli in modo che lo sgrondo risponda a un terzo del tetto completo. [Cfr. fig. 3.8 dis. 5].

3.1.9. La capriata

Quando esigenze costruttive e/o funzionali non permettevano di impiantare una spina di pilastri, o comunque un sostegno intermedio, bisognava ricorrere a sistemi diversi per ridurre la luce delle travi orizzontali (mensole, saettoni ecc.; fig. 3.9 dis. 2). Tuttavia quando la luce diventava troppo ampia non si poteva fare a meno della capriata.

Plinio (*N.H.*, 16, 201; 26, 102), Suetonio (*Claud.*, 18) e Dione Cassio (55, 8; 66, 24) attestano travi di oltre 30 m di lunghezza e di considerevole sezione (cfr. par. 7.6), il cui impiego, date le dimensioni, non poteva essere che quello di catena di una capriata.

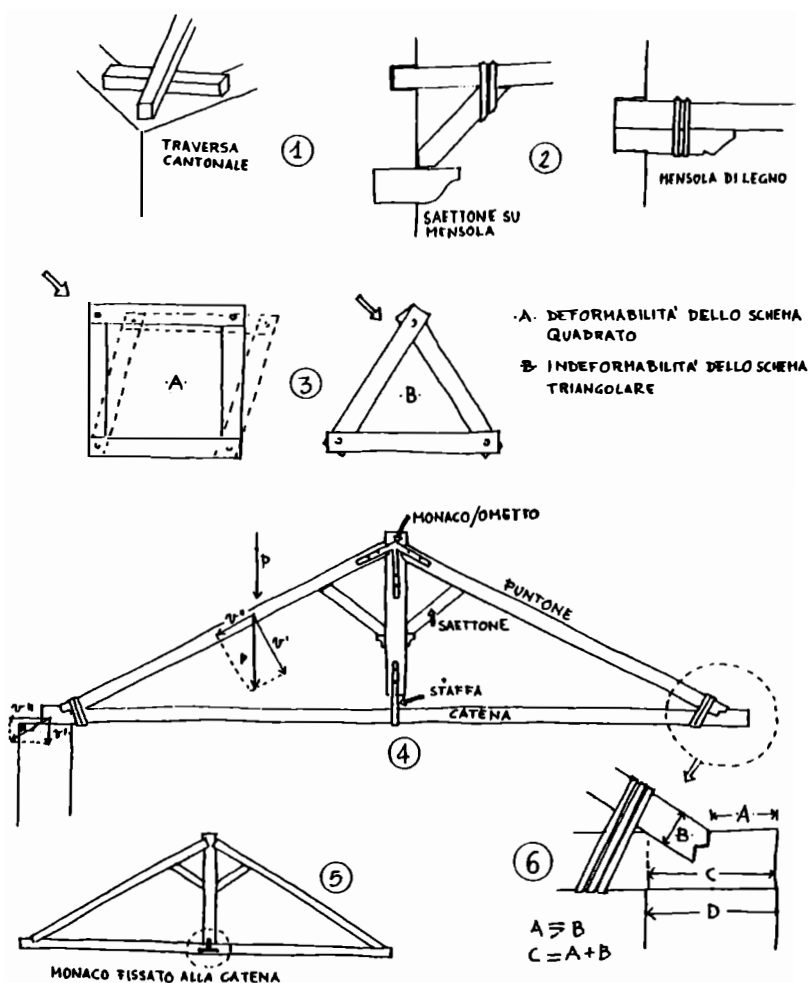
Questa è sostanzialmente una struttura a schema triangolare: la base è la *catena* e i lati i *puntoni*. Gli elementi erano collegati in modo da stabilire un sistema in equilibrio per mutuo contrasto sopportando sollecitazioni considerevoli. Si trattava in sostanza della cellula base della trave reticolare in cui molto si contava sull'indeformabilità dell'insieme dipendente all'indeformabilità del singolo elemento (fig. 3.9 dis. 3).

Il carico che agiva sui puntoni con direzione verticale si scomponeva in due forze, una perpendicolare all'asse dei puntoni e l'altra coassiale. La forza normale al puntone lo sollecitava a flessione, taglio e compressione. Invece le sforzo diretto secondo l'asse si scomponeva a sua volta in una forza coassiale alla catena, che risultava così in tensione, e un'altra, normale a essa, e verticale al muro di appoggio. Nella struttura il monaco poteva giocare ruoli diversi: o come contraffisso della catena, se arrivava a toccarla ed era con essa solidale (fig. 3.9 dis. 5), oppure come solo appoggio dei puntoni ed eventuale sostegno della catena per mezzo di una staffa se ne restava distanziato (fig. 3.9 dis. 4). In genere, per realizzare una costruzione solida la catena doveva sporgere oltre il puntone di una misura almeno pari all'asse verticale della sezione di questo, e poggiare sul muro per tale spazio aumentato di quello dell'attacco del puntone stesso (fig. 3.9 dis. 6).

Nel caso di puntoni coadiuvati da saettoni attestati all'ometto, i saettoni erano sollecitati a compressione e l'ometto a trazione; questo, se avesse toccato la catena, avrebbe potuto aiutarla nella flessione.

Questi dati possono essere utili nelle ipotesi ricostruttive dei sistemi di copertura.

Naturalmente il tipo di ossatura era in stretto rapporto con la luce da coprire e il carico da sopportare: si passava così dalla capriata semplice, formata da puntoni, catena, monaco e saettoni e adatta per luci fino a 12/15 m, a quelle più complesse (palladiane) con cotrocatena e saettoni,

FIGURA 3.9
Capriate

a doppi o tripli monaci e così via, per luci di 25 m e oltre (fig. 3.10) in una gamma di varianti vastissima.

Data la sua complessità, la capriata era comunque una struttura costosa che, se possibile, si evitava ricorrendo a un sostegno mediano continuo (muro) o discontinuo (spina di colonne, pilastri ecc.) per appoggiarvi il colmareccio (*columen*; cfr. Tempio di Hera, cosiddetta Basilica,

FIGURA 3.10
Capriate semplici e complesse

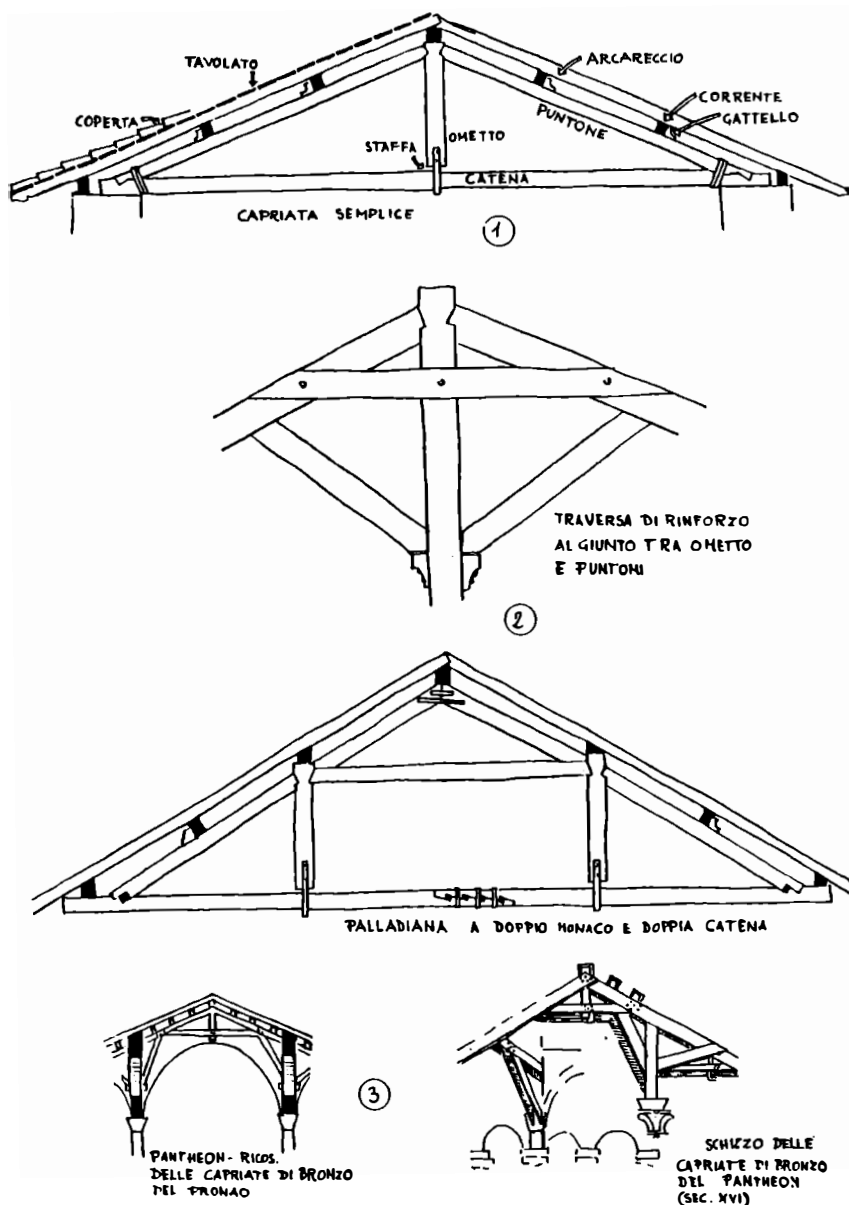
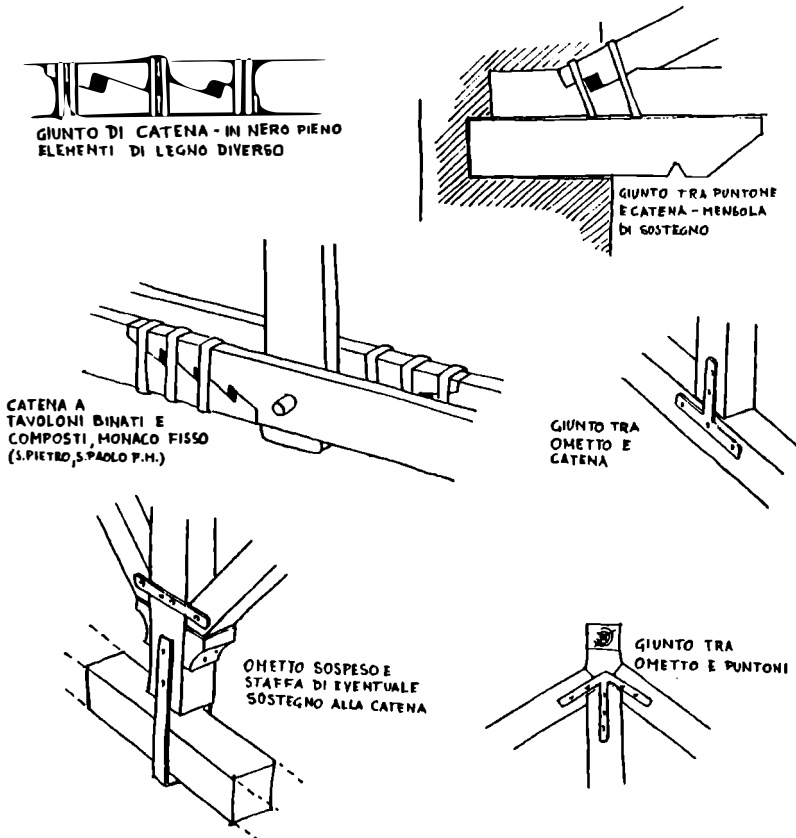



FIGURA 3.11
Tipi di giunti per capriate

a Paestum). In questo caso, dato che per costruzione lungo la linea di colmo si stabiliva una cerniera, non si verificava l'inconveniente denunciato da Vitruvio (7, 1, 2 ss.; cfr. par. 6.1) per i pavimenti su solaio ligneo poggiante su un muro di mezzeria sottostante.

Il legname adoperato per la grossa armatura era l'abete, il pino, il castagno selvatico, il larice, alcuni tipi di quercia, soprattutto quelli cresciuti in terreni non sassosi (cfr. par. 7.6) o anche essenze di importazione come il cedro del Libano.

Vitruvio, nei suoi riferimenti ai sistemi di copertura in legno, per noi di non facilissima comprensione tanto nel dettaglio quanto nella tessitura

strutturale, sembra non fare riferimento alla capriata intesa nel senso corrente del termine.

Questo ha fatto ritenere la capriata un'acquisizione posteriore al V secolo a.C. Il problema per l'architettura romana diviene inconsistente se si pensa ai disegni pervenutici, in numerose redazioni, delle travature di bronzo del pronao del Pantheon (fig. 3.10 dis. 4). Non c'è dubbio che esse siano capriate a monaco fisso, ed è certo che per arrivare a costruirle con elementi di bronzo a sezione di U rovescia si sia passati attraverso una lunghissima esperienza di incavallature di legno.

Qualcuno ha pensato, credo erroneamente, che il bronzo in realtà fosse la fodera di protezione di travature di legno. Pur ammettendolo per un attimo, la circostanza resterebbe ininfluente per il problema dell'esistenza o meno della capriata nell'antichità romana. A titolo di curiosità il bronzo recuperato da Urbano VIII nel 1626 pesava oltre 15 tonnellate tra lastre e cavicchi (cfr. Venuti, *Dalle memorie della fabbrica di San Pietro*, cit. con errori, in Uggeri, 1802, p. 106). Non dobbiamo dimenticare la rappresentazione pittorica delle capriate lignee della basilica costantiniana di S. Pietro. In questo caso, però, non si può escludere che si trattasse di un rifacimento, dato che il dipinto è del XVII secolo.

L'Uggeri (1802, p. 108), che vide le capriate di S. Paolo fuori le mura prima del famoso incendio, ricorda che i benedettini affermavano che erano costruite con cedro del Libano importato appositamente, e continua:

alcune di queste catene, o corde binate [cioè composte di due elementi affiancati], sono di un pezzo solo, la maggior parte però di due, e di tre pezzi fra loro dentati e imbraccati con forti cerchi di ferro. Questa costruzione è opera del IV secolo. [Cfr. fig. 3.11].

3.1.10. Volte finte e soffitti curvi

Vitruvio (7, 3, 1 ss.) descrive con grande precisione come costruire le finte volte da applicare alle coperture lignee per ottenere l'effetto di una volta reale (fig. 3.12). Si dovevano disporre dei travicelli in parallelo alla distanza massima di due piedi l'uno dall'altro. Nella scelta del legname era da preferire il cipresso perché l'abete si deteriorava facilmente per i tarli e il tempo. Dopo avere centinato adeguatamente i travicelli, bisognava fissare le traverse di legno (*catenae*) al solaio (*contignatio*) o al tetto (*tectum*), e si doveva fissarle con una fitta chiodatura.

Anche le traverse dovevano essere di un legno resistente ai tarli, alla vecchiaia e all'umidità, come il bosso, il ginepro, l'olivo domestico, il rovere, il cipresso e altri simili, esclusa la quercia che, torcendosi, provocava fessurazioni nelle strutture in cui era inserita (cfr. par. 6.1). Collocati i travicelli si dovevano legare a essi, per mezzo di corde di sparto di Spagna, la canne greche schiacciate. E subito bisognava applicare al di sopra della "camera" così ottenuta, malta di calce e arena per sostenere quelle infiltrazioni che eventualmente fossero cadute dal solaio o dal tetto. In mancanza di una quantità sufficiente di canne greche, si poteva

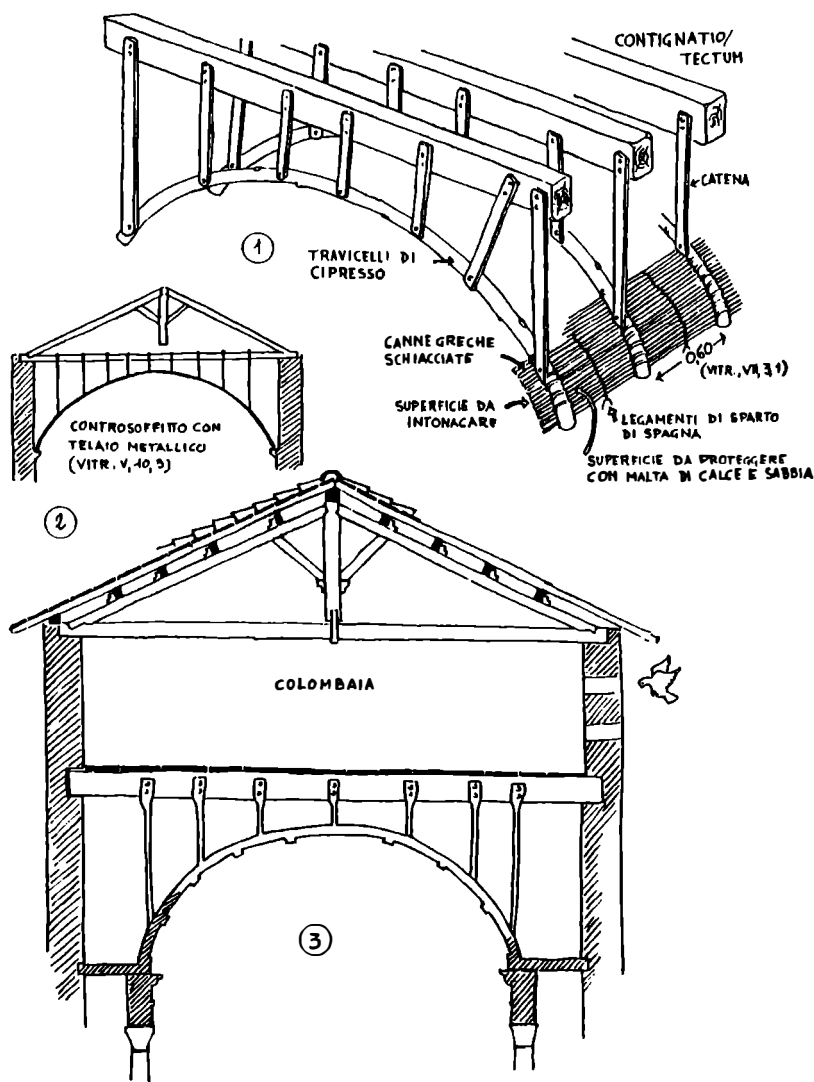
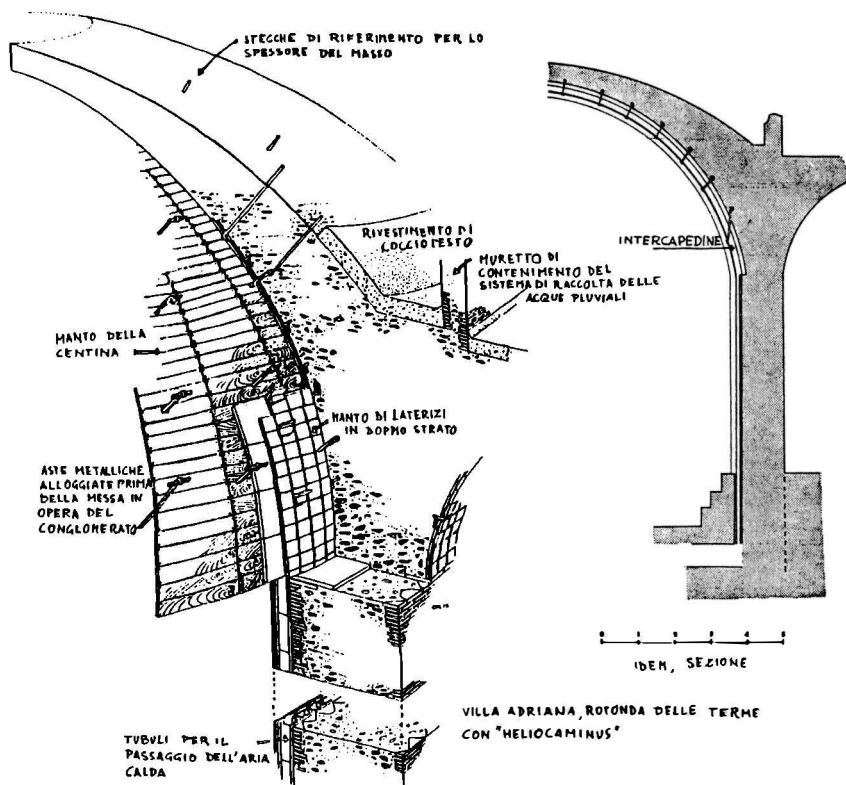
FIGURA 3.12
Controsoffittature

ricorrere alle cannucce di palude e strami uniti con corde poste alla giusta distanza, non superiore ai due piedi, legati a loro volta ai travicelli sempre con corde e con zeppe di legno inserite. Poi si poteva intonacare l'intradosso (fig. 3.12 dis. 1).

FIGURA 3.13
Controcalotte nei vani termali

Fra le finte volte si comprendono pure gli allestimenti usati negli edifici termali per proteggere l'armatura del tetto.

Vitruvio (5, 10, 3) sostiene la maggiore utilità delle coperture in muratura, tuttavia afferma che quando si userà il legname, bisognerà porre al di sotto un rivestimento di terracotta così fatto: si debbono piegare ad arco delle aste metalliche e fissarle con fitti uncini di ferro alla travatura. Le aste arcuate verranno poi disposte in modo che le tegole smarginate vi poggino sopra con le estremità e così le intere concamerazioni poggiando sul ferro resteranno solide. I giunti di queste volte vanno stuccati con argilla e lana. L'intradosso deve essere prima intonacato alla grossa con cocciopesto e poi rifinito. Se nei *calidaria* queste calotte verranno fatte doppie [in modo da realizzare un'intercapedine] il risultato sarà migliore. Infatti l'aria calda [e l'umidità di condensa] passando in essa non potrà rovinare il legno. [Cfr. anche, Favent., 17; Pallad., *Op. Agr.*, 1, 40].

Un tipo evoluto di questa tecnica venne applicato frequentemente nei vani riscaldati delle terme coperti con volta massiva (Giuliani, 1975), dove le controcalotte venivano appese a uncini incastrati nel calcestruzzo al momento della gettata (fig. 3.13) e sostenevano un manto di laterizio (intonacato e decorato nell'intradosso) che dava luogo a un'intercapedine per il passaggio dell'aria calda. La circolazione di questa era assicurata e favorita da sfiatatoi comunicanti con l'esterno.

3.2. Il sistema spingente

Comprende tutte le strutture capaci di scaricare pesi (o tensioni) secondo risultanti diverse dalla verticale. Si tratta quindi dello *schema arcuato* con tutte le relative connessioni. La sollecitazione, come s'è detto, avviene soltanto per *compressione*, e quindi il sistema è il più adatto alle qualità meccaniche di tutti i materiali da costruzione antichi.

Seneca (*Epist.*, 90, 30) presenta il problema dell'origine dell'arco, una pseudo *crux* dell'archeologia, con grande chiarezza e intelligenza:

> "*Democritus, inquit (scil. Poseidonius) invenisse dicitur fornicem, ut lapidum curvatura paulatim inclinatorum medio saxo alligaretur*". *Hoc dicam falsum esse; necesse est enim ante Democritum et pontes et portas fuisse.* [...]

Il problema che sembra interessare più gli archeologi non è quello di come funzioni il sistema spingente ma piuttosto chi abbia inventato l'arco. Così su questo i pareri sono diversi, e il primato viene assegnato a differenti culture: l'orientale, l'egiziana, la greca, l'etrusca.

Dal momento però che la storia dell'edilizia è determinata dalle applicazioni della soluzione tecnica e non dalla sua invenzione, sarà meglio cercare di capire il funzionamento, il ruolo e l'impiego dell'arco nelle costruzioni.

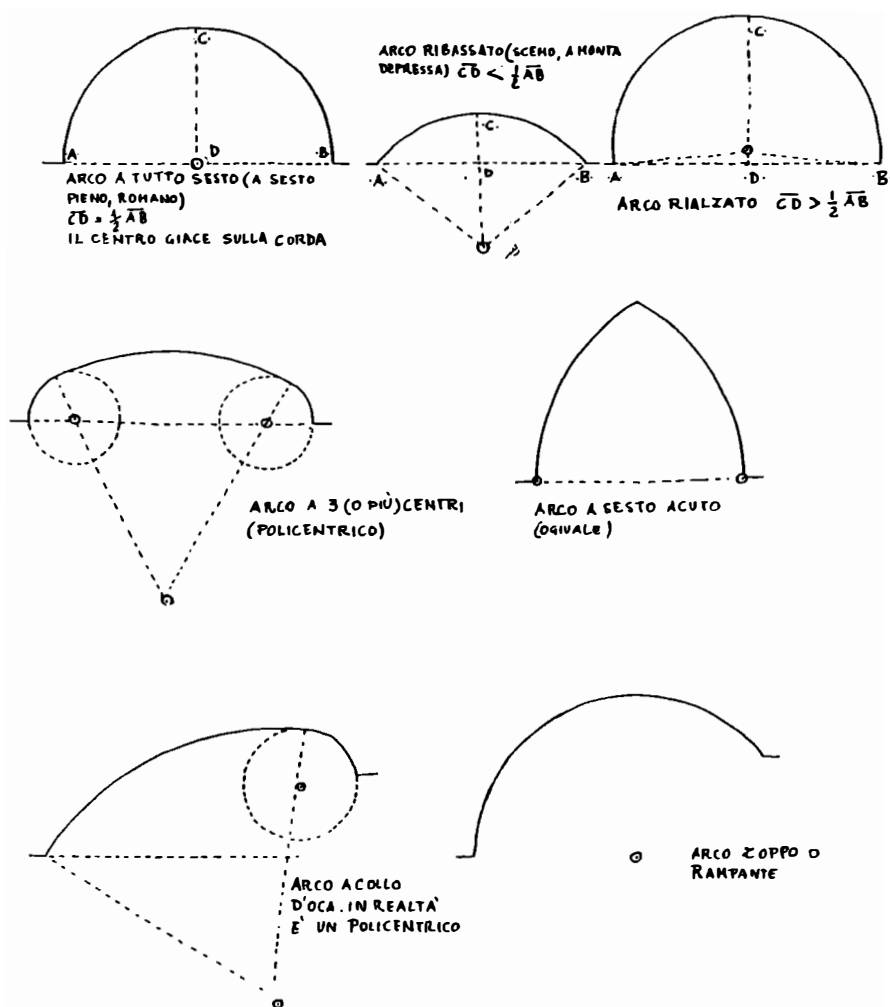
3.2.1. L'arco

Per la distinzione dal punto di vista formale si veda la figura 3.14.

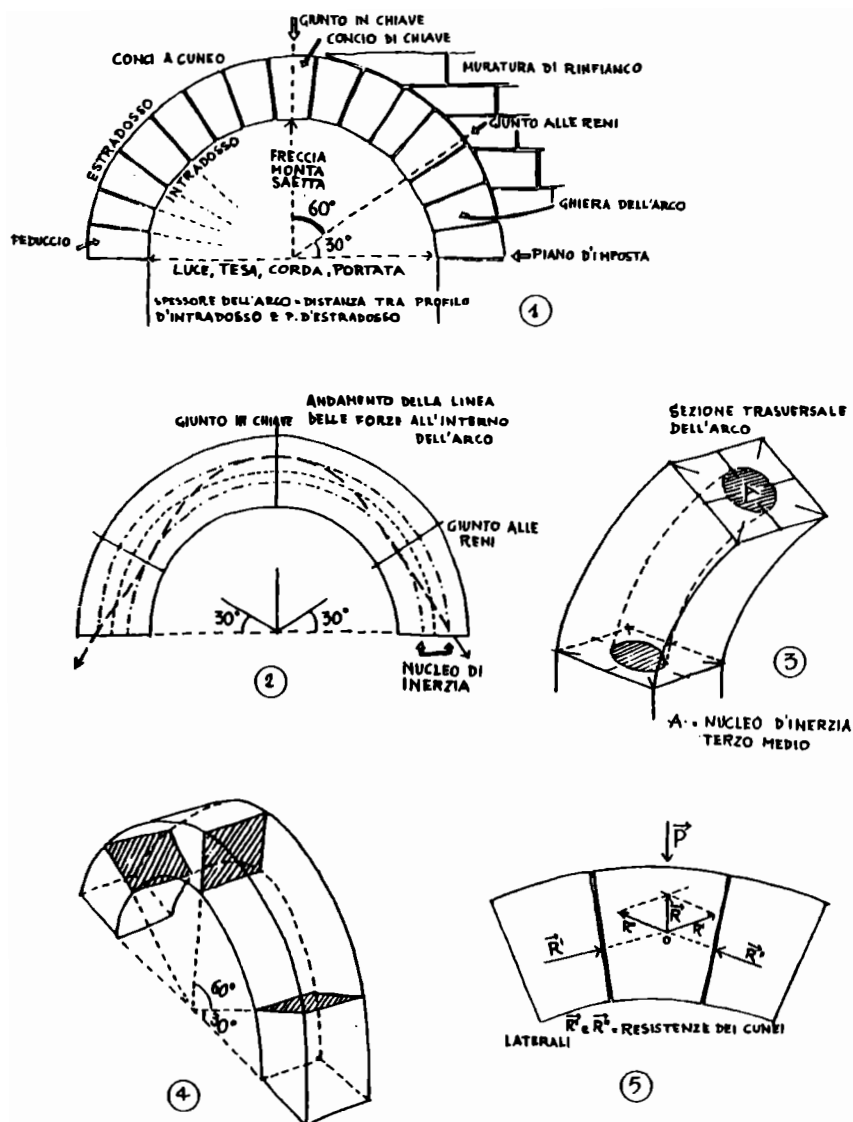
L'arco è una struttura curva impostata su due piedritti convenientemente distanziati con la quale si supera un vano. È necessario però che essa sia composta di più elementi, (altrimenti si ricadrebbe nel caso dello pseudo arco; cfr. par. 3.1.3), disposti radialmente rispetto al centro (o ai centri) dell'arco, e che il rinvio dei carichi sui piedritti abbia andamento diverso dalla verticale e diretto verso l'esterno.

La direzione di questa spinta tende perciò a ribaltare i piedritti, e le pressioni che gli elementi dell'arco si trasmettono aumentano di intensità man mano che ci si avvicina all'imposta.

Nell'arco la sollecitazione si dispone nel modo esposto nel grafico riportato alla fig. 3.15 dis. 2 (ovviamente enfatizzato per facilitare la comprensione). Si noterà che la linea delle forze non coincide con l'asse mediano, e quindi con il terzo medio, se non in minima parte e in zone

FIGURA 3.14
Forme geometriche di archi

precise, mentre se ne allontana sensibilmente in corrispondenza delle reni e del cervello. Ne risulta che proprio qui si localizzano i probabili punti di frattura. Ecco perché nelle volte e negli archi le lesioni si verificano in corrispondenza dei giunti in chiave e alle reni.

La debolezza dell'arco in corrispondenza del giunto alle reni fu subi-

FIGURA 3.15
Dislocazione delle tensioni nell'arco

to individuata come dimostra il tentativo di rimediarvi messo in opera nel ponte Fabricio (62 a.C.; e visibile ancora nel lato a monte). Si tratta di due segmenti di arco a conci posti all'estradosso di quello portante e limitati alle sole reni. L'espediente avrebbe funzionato solo se i conci fossero stati monolitici e avessero interessato entrambe le ghiere: in tale caso si sarebbe verificato un reale ampliamento della sezione alle reni. Così, invece, si creò solo impaccio nei raccordi tra ghiera, muratura di rinfianco e pilone, senza alcun reale vantaggio.

Le condizioni di stabilità dipendono da diversi fattori e quindi cambiano da caso a caso; è possibile tuttavia verificare una condizione generale. Ogni arco, come ogni solido geometrico, comprende nella propria sezione una zona in cui deve ricadere la linea delle forze: è il nocciolo d'inerzia (fig. 3.15 dis. 3). La diretta proporzionalità tra nucleo d'inerzia e sezione è evidente e spiega come sia sufficiente aumentare l'una per aumentare l'altro; finché la risultante rientra nel terzo medio si ha lavoro a compressione, se invece ne esce si ha flessione, e quindi lesioni.

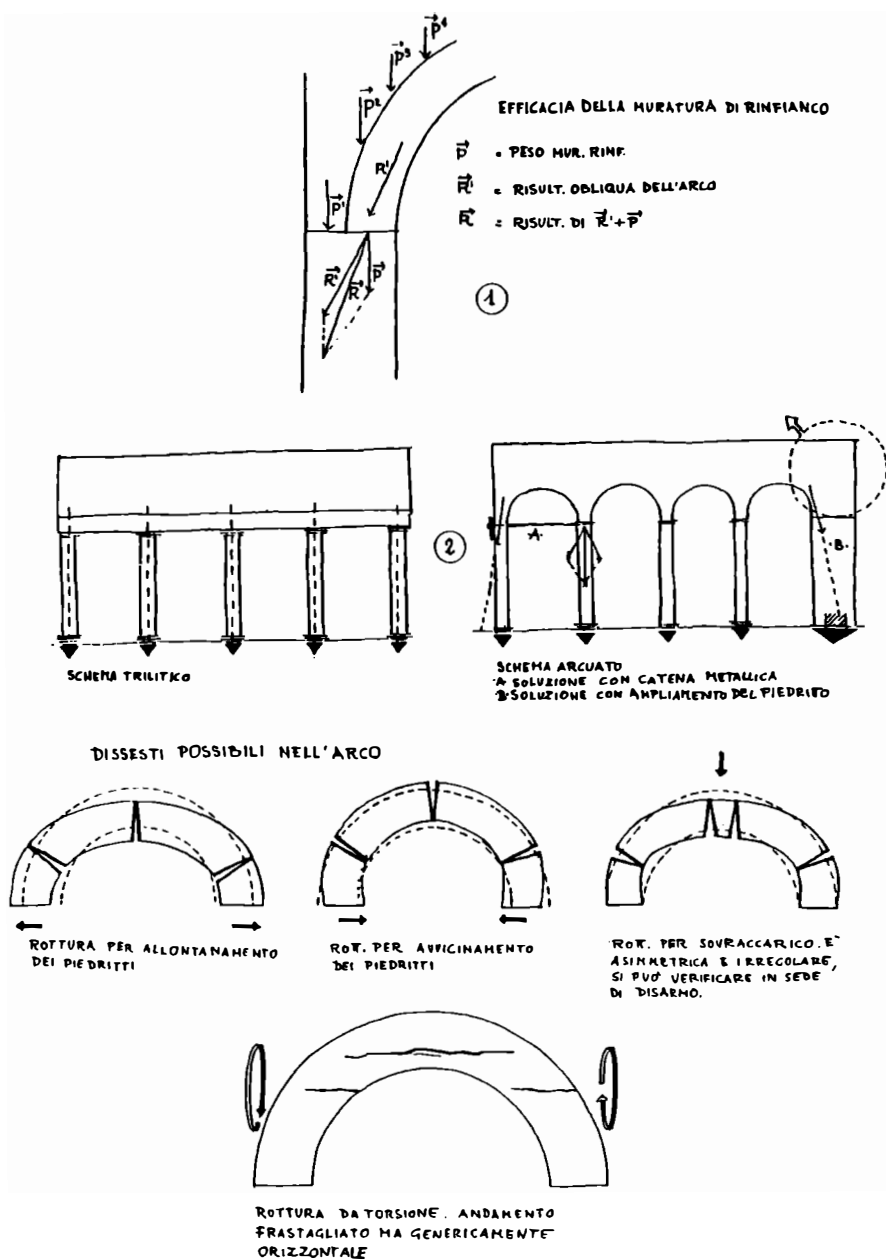
Questo concetto elementare, che riguarda naturalmente anche i piedritti, permette di capire tanti interventi di consolidamento effettuati nell'antichità su strutture dissestate: esemplari in questo senso quelli dell'acquedotto Claudio, o del caseggiato degli Aurighi a Ostia (fig. 3.19 diss. 2, 3).

La stabilità dell'arco, a parità di luce, materiale e carico dipende dal rapporto tra la freccia e la corda. Variando questo cambia l'intensità dell'azione totale che viene trasmessa alle spalle e la sua direzione. Questa sarà prossima alla verticale in un arco a sesto acuto, e si avvicinerà all'orizzontale nella piattabanda. La diminuzione della sezione muraria al di sopra delle reni, l'impiego al cervello di materiali leggeri come spugna vulcanica e pomice e l'applicazione della muratura di rinfianco (fig. 3.16 dis. 1) sono tutti fattori che concorrono alla maggiore stabilità della costruzione.

L'arco per eccellenza, quello che viene per primo alla mente, forse per il suo contenuto monumentale, è quello a blocchi. Per comprenderne il funzionamento bisogna ricordare una delle macchine basilari della meccanica, appunto il cuneo: perché si tenga in equilibrio è necessario che la resistenza che agisce sopra uno dei suoi lati stia alla forza motrice (peso) come la lunghezza del lato sta alla base del cuneo (fig. 3.15 dis. 5).

Siccome il concio è un prisma triangolare tronco, si trova appunto nelle condizioni di lavoro del cuneo. Estendendo il fenomeno all'intero organismo, si otterrà una risultante che coincide solo sporadicamente con l'asse geometrico del solido "arco". Così è facile intuire la differenza tra lo schema spingente e quello non spingente. Tuttavia per evidenziarla meglio ricorriamo alla figura 3.16 dis. 2 che riporta in parallelo l'applicazione dei due sistemi.

Nel grafico vediamo che le spinte degli archi contigui, combinandosi, si risolvono in una risultante prossima alla verticale, mentre le colonne estreme restano squilibrate dalla spinta obliqua proveniente da un solo lato. Per questo bisognava che il piedritto estremo fosse un pilastro di

FIGURA 3.16
Stabilità dell'arco

sezione maggiore, capace di accogliere nel terzo medio la risultante obliqua delle forze. Di questo principio parla con grande precisione Vitruvio (cfr. par. 4.1).

Naturalmente quando si dice che le spinte oblique di due archi contigui si compensano in una risultante verticale, non s'intende la verticale teorica ma una "quasi" verticale. Infatti per avere quella reale bisognerebbe che le componenti del sistema fossero isotrope e isomorfe, e i carichi perfettamente uniformi. Dunque la risultante è verticale solo entro certi limiti, e pertanto nel caso di pilastri molto alti potrebbe tendere a uscire non solo dal nucleo di inerzia ma addirittura dal pilastro.

Per evitarlo si ricorreva (cfr. acquedotti e ponti) all'inserimento in opera (o durante il consolidamento) di archi intermedi per ricondurre le linee oblique alla verticale. È anche frequente il caso dell'irrobustimento di un arco con un altro posto al di sotto. E questo nonostante gli inconvenienti connessi all'unione di un'armilla nuova a una vecchia, e al differente coefficiente di assestamento delle malte.

Dalla diversità del comportamento dell'arco rispetto all'architrave derivò una maggiore libertà di scelta nel materiale che non poteva non riflettersi sulla stessa tecnologia della struttura.

ARCHI DI BLOCCHI DI PIETRA

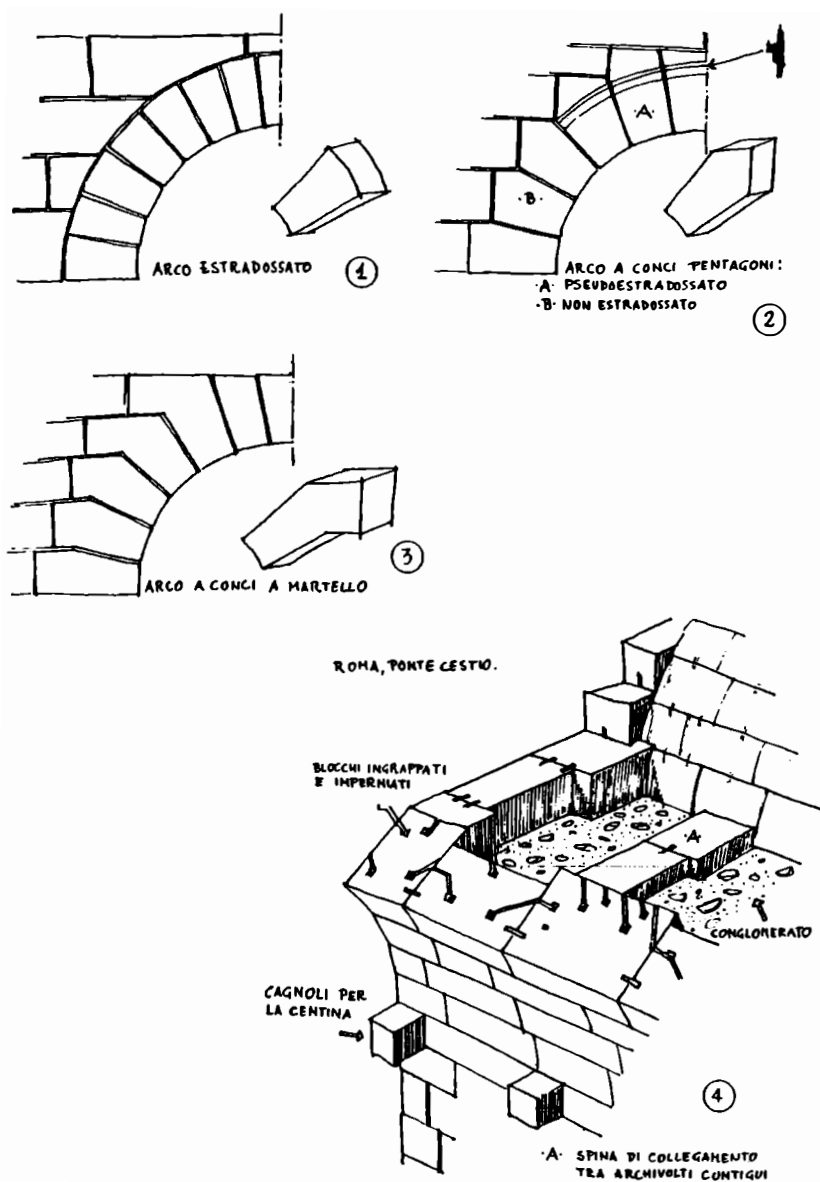
Di regola i conci dell'arco sono dispari essendo disposti in numero pari ai lati di quello centrale (chiave), tuttavia vi sono casi (Santuario di Ercole a Tivoli) in cui si ha sistematicamente un numero pari con giunto di malta in chiave.

1. *Arco estradossato*: (fig. 3.17 dis. 1) profilo estradossale parallelo all'intradosso. Mancava un vero collegamento tra arco e parete, per questa ragione si preferì quasi sempre, a partire almeno dall'età augustea, impiegare nelle strutture di grande impegno i tipi elencati sotto.
2. *Arco a conci pentagoni*: (fig. 3.17 dis. 2) permetteva un ottimo collegamento con la parete. Era necessaria una grande accuratezza nell'esecuzione e una perfetta regolarità dei filari. Diventava *pseudoestradossato* quando sulla faccia esterna dei conci si ricavava una cornice curva aggettante e concentrica all'intradosso.
3. *Arco a conci a martello*: (fig. 3.17 dis. 3) comportava un lavoro assai complesso senza che vi fosse un reale vantaggio rispetto al tipo precedente data la facilità di lesione in corrispondenza dell'angolo. Anche questo poteva essere peseudoestradossato.

Gli archi a blocchi potevano avere gli elementi posti a semplice contrasto oppure ingrappati tra loro come nella figura 3.17 dis. 4.

ARCHI DI CONGLOMERATO

Almeno a partire dal III secolo a.C. si costruirono anche archi in calcestruzzo. Essi, una volta avvenuto il tiro, dovevano considerarsi monolitici, almeno fino a quando non sopraggiungessero lesioni a riproporre lo schema dell'arco a conci.

FIGURA 3.17
Archi di conci

Le loro caratteristiche riguardano sia gli aspetti formali (assetto esterno della ghiera) sia strutturali (tessitura interna del pietrame).

1. *Ghiera in piccoli conci*: (fig. 3.18 dis. 1) in genere era formata di blocchetti cuneiformi di tufo o calcare. La struttura del nucleo era in conglomerato di pietrame di dimensioni maggiori di quello del normale calcestruzzo e disposto radialmente a formare un vero e proprio arco. Al di sopra di questa prima "sfoglia" il materiale era disposto per strati orizzontali. Il sistema si trova associato con l'opera incerta, quella a ciottoli e la reticolata, anche se verso il declinare del I secolo a.C. già si incontrano esempi di volte con struttura a strati orizzontali per l'intero spessore (cioè senza lo strato intradossale a scapoli dislocati radialmente). In sostanza il periodo di tempo occupato da questa tecnica va dall'inizio dell'uso dell'arco in muratura fino verso la metà del I secolo a.C. Naturalmente in alcune zone, come, per esempio, in Campania, si verificano attardamenti (almeno fino alla metà del I secolo d.C.).

2. *Ghiera in laterizio*: (fig. 3.18 dis. 2) fu per lo più realizzata in bipedali o sesquipedali. La struttura interna non era interessata per l'intero spessore dai mattoni, che, adoperati in fette, entravano nel nucleo per 10/15 cm soltanto. A intervalli regolari però si inseriva un mattone intero che penetrando divideva il nucleo in una specie di conci artificiali formati da conglomerato allettato quasi sempre in orizzontale. In costruzioni di grande impegno statico si trovano archi a duplice e triplice ghiera semplicemente sovrapposte senza ammorsature (fig. 3.18 dis. 3); al più si evitava l'allineamento dei laterizi interi per armille contigue. In qualche caso tuttavia, come nel Teatro di Ostia, i mattoni sono ammorsati (fig. 3.18 dis. 4).

3. *Ghiera in laterizio e blocchetti*: scarsamente usata nel territorio romano laziale, compare però a Pompei (Casa del Citarista) o in provincia, Treviri (fig. 3.18 dis. 5).

Proprio per la sua costituzione, un nucleo interno e due armille esterne, l'arco in muratura non era omogeneo: le due cortine risultavano meno compressibili durante il periodo di presa rispetto al nucleo e così poteva avvenire il distacco. Questo non implicava necessariamente il crollo dato che molto spesso l'inconveniente si risolveva in una reazione separata dei tre elementi che con il passare del tempo poteva diventare anche sorte diversa. È proprio questo il caso di un'arcata del Ponte Lucano presso Tivoli dove a seguito delle sollecitazioni del traffico pesante e di una piena particolarmente forte, qualche anno fa è crollato il nucleo dell'arcata, in calcestruzzo, mentre sono rimaste integre le due ghiere di travertino (fig. 3.19 dis. 1).

Proprio per evitare questo spesso si realizzavano anche gli intradossi delle arcate dei ponti (cfr., per esempio, Ponte Cestio a Roma) con blocchi tra loro imperniati e ingrappati e si inserivano spine di conci nella muratura di rinfianco tra gli archi così da formare contenitori chiusi per il conglomerato (fig. 3.17 dis. 4).

L'arco in muratura aveva un momento particolarmente delicato all'atto del disarmo della centina (cfr. par. 3.2.4), quando tendeva a cedere,

FIGURA 3.18
Archi di conglomerato

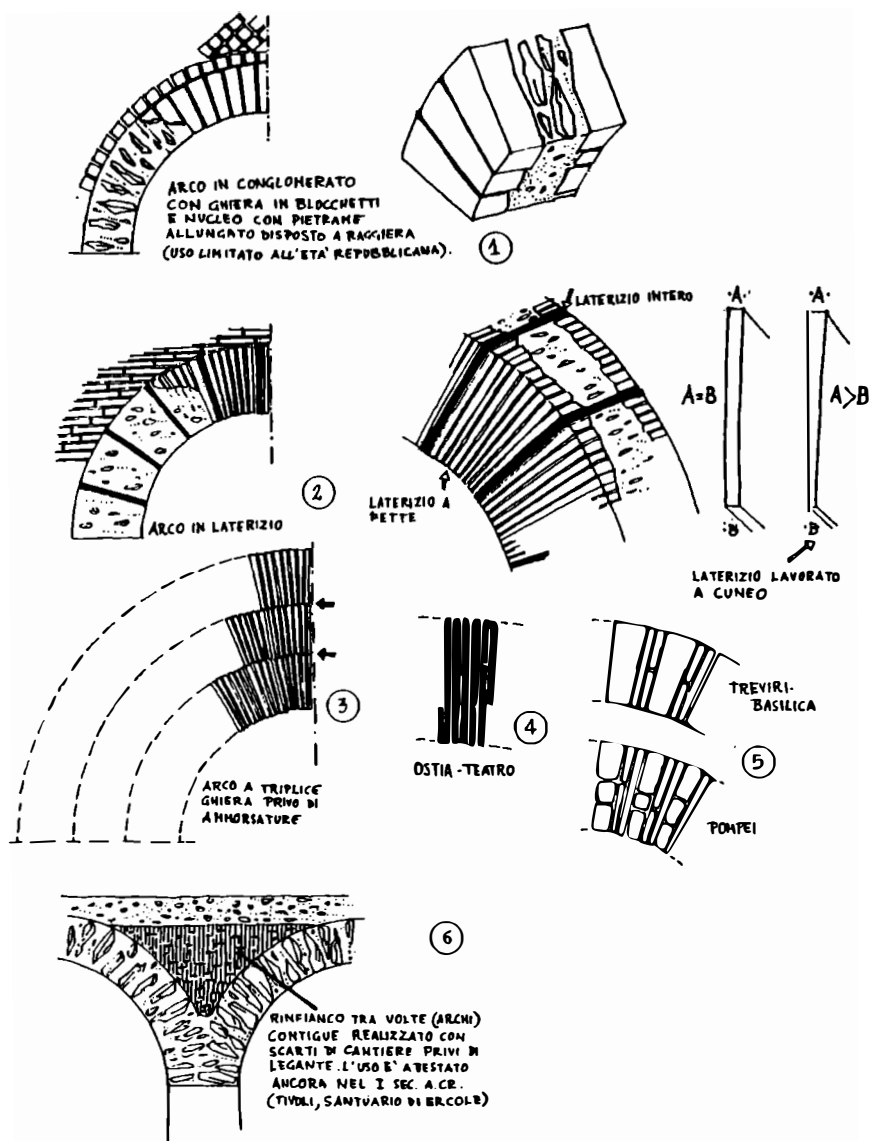
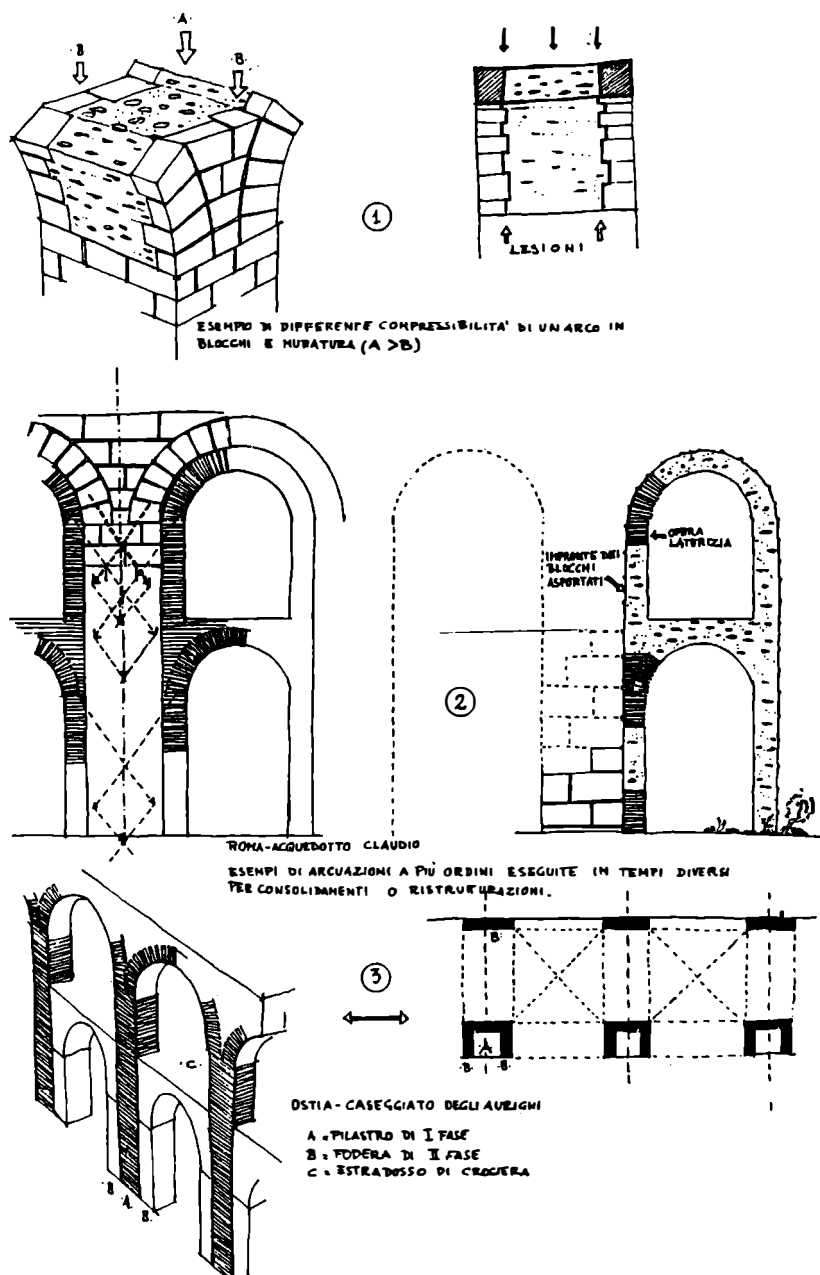



FIGURA 3.19
Disomogeneità e consolidamenti

come per sovraccarico, aprendosi in chiave verso l'intradosso e alle reni verso l'estradosso. Per ridurre il fenomeno, se non eliminarlo del tutto, si ricorreva a una robusta muratura di rinfianco che contrastava il sollevamento alle reni agevolando la serrata in chiave. Essa però non fu sempre applicata. Spesso in esempi tardo repubblicani, in teorie di archi (o volte) si trovano i rinfianchi riempiti con materiale inerte di riporto (spesso scarti di lavorazione) che denunciano comunque la volontà di alleggerire quei punti e non, come sembrerebbe corretto, di appesantirli (fig. 3.18 dis. 6). Non è escluso però che questo sia la spia di un lavoro che procedeva per tempi diversi: prima lo strato a struttura radiale e successivamente, a tiro iniziato, il resto; in tal caso, forse, si sarebbe ridotta la tendenza dell'arco a sedersi al momento del disarmo, rendendo superflua la necessità di serrare in chiave.

ARCHI IN PONTI E ACQUEDOTTI

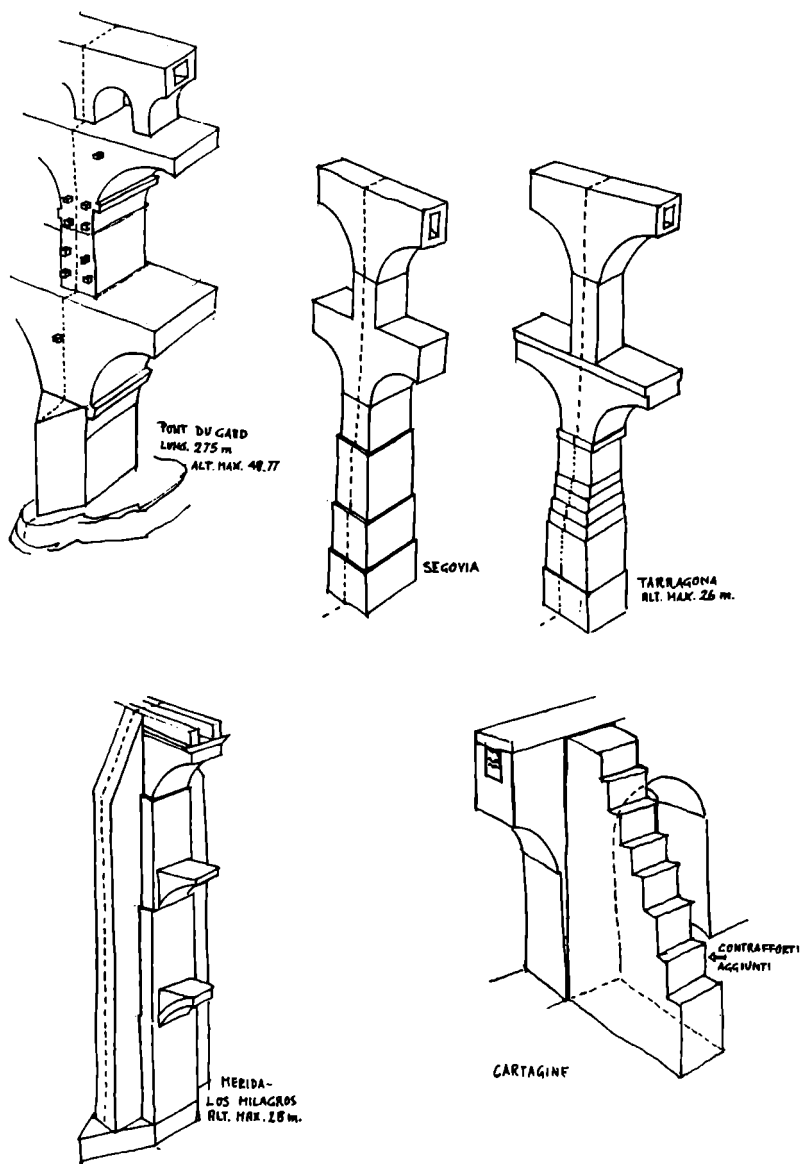
I ponti e gli acquedotti romani raramente ebbero campate ampie e furono sempre provvisti di piloni di grossa sezione in rapporto alla luce coperta. E ciò per due buone ragioni: perché a luce maggiore corrispondevano sempre più gravi sollecitazioni sui piedritti e perché le limitazioni tecniche impedivano di realizzare fondazioni profonde quanto avrebbero richiesto piloni di sezione ridotta. Si preferiva quindi ridurre la luce delle campate a vantaggio della sezione delle *pilae* per ripartire il più possibile i carichi.

Si riportano in serie alcune luci di archi di ponti: *Ponte di Narni*: lunghezza totale m 191, 4 archi diseguali: m 22,30; 40,15; 33,90; 42,40; *Ponte Salario*: 3 archi: m 4,12; 22,76; 4,12; *Ponte Elio*: 5 archi: m 7,00; 18,33; 18,33; 18,33; 7,00; *Ponte Fabricio*: 2 archi: m 24,25; 24,50; (pila mediana di 10 m alla base); *Ponte Cestio*: 3 archi: m 5,80; 23,65; 5,80; *Ponte di Alcantara*: lunghezza totale 188 m, 6 archi: m 18,00; 18,00; 30,00; 30,00; 18,00; 18,00 (piloni centrali da 10 m e laterali da 6; altezza sul pelo dell'acqua m 48); *Ponte di Salamanca*: lunghezza totale m 735, 27 archi: tutti da 20,30 m di luce, piloni da 6,48.

Del resto la straordinaria resistenza di questi ponti dimostra come i costruttori avessero visto giusto risolvendo i gravi problemi del rapporto tra luce dell'arco e sezione del pilone, e quello del rapporto tra sezione del pilone e sollecitazione della corrente (anche in regime di piena) come pure quello della fondazione subacquea (cfr. par. 5.3) tenuto conto delle limitazioni della tecnologia dell'epoca (fig. 3.20).

Gli innumerevoli esempi di ponti costruiti dai romani dimostrano come essi non avessero una grande dimestichezza con gli archi a sesto ribassato, probabilmente a causa delle forti spinte laterali. Le fonti letterarie non ci danno alcun aiuto per stabilire se ci fosse un metodo proporzionale per individuare il rapporto tra lo spessore in chiave e la luce dell'arco.

Il Leger (1875, pp. 120 ss.) tuttavia, in base alle misurazioni di classi monumentali diverse, ha notato che il rapporto nelle *costruzioni civili*

FIGURA 3.20
Ponti di acquedotti

varia da 0,83 (Arco di Tito) a 0,152 (arcate di Nîmes), stabilendo per otto esempi una media di 0,116. Nei *ponti stradali* invece il rapporto oscilla tra 0,045 (Ponte di Narni) e 0,133 (Ponte Fabricio) con una media, per venti esempi, di 0,086. Infine negli acquedotti si ha una oscillazione tra 0,100 (Arles) e 0,280 (acquedotto Alessandrino), con una media, su undici esemplari, di 0,138.

Il sospetto che l'oscillazione possa dipendere dai materiali sembra smentito dal fatto che nella stessa opera – quindi a parità di tecnica e materiali – l'oscillazione si verifica ugualmente. In sostanza sembra che non ci fosse una regola precisa per calcolare le dimensioni dello spessore dell'arco in rapporto alla luce, non si riesce a individuare alcuna formula fissa per una costante di sicurezza.

Sembra accertato solo che ogni volta che per verifica applichiamo la formula di Perronet ci accorgiamo che anche le dimensioni più piccole date dai romani sono superiori ai risultati del calcolo. Forse è per questo che negli archi, così come nelle volte in muratura, la stabilità sembra fare anche un qualche affidamento alla resistenza a trazione, naturalmente non calcolata nelle murature.

ARCO DI SCARICO

Detto anche *sordino*, è di regola una struttura cieca compresa nello spessore di una parete che, convogliando i carichi soprastanti su piedritti adeguatamente separati, protegge una zona delicata per ragioni diverse (presenza di un vuoto, necessità di saltare un tratto di fondazione più leggera o di dirigere le spinte in un punto particolare ecc.; fig. 3.21). Vitruvio (6, 8, 3; cfr. par. 4.1) ne descrive la funzione a protezione degli architravi di legno.

Questo accorgimento fu elevato a sistema nelle costruzioni complesse (in tale senso è esemplare il Pantheon).

Qualche autore (per esempio, Ward Perkins) ne ha sostenuto l'inutilità perché, siccome dopo la presa la muratura poteva considerarsi un monolito, l'arco avrebbe perso gran parte della sua funzione. Va detto però che:

a) la muratura impiega anche anni a far presa completa e che durante questo tempo gli archi funzionavano;

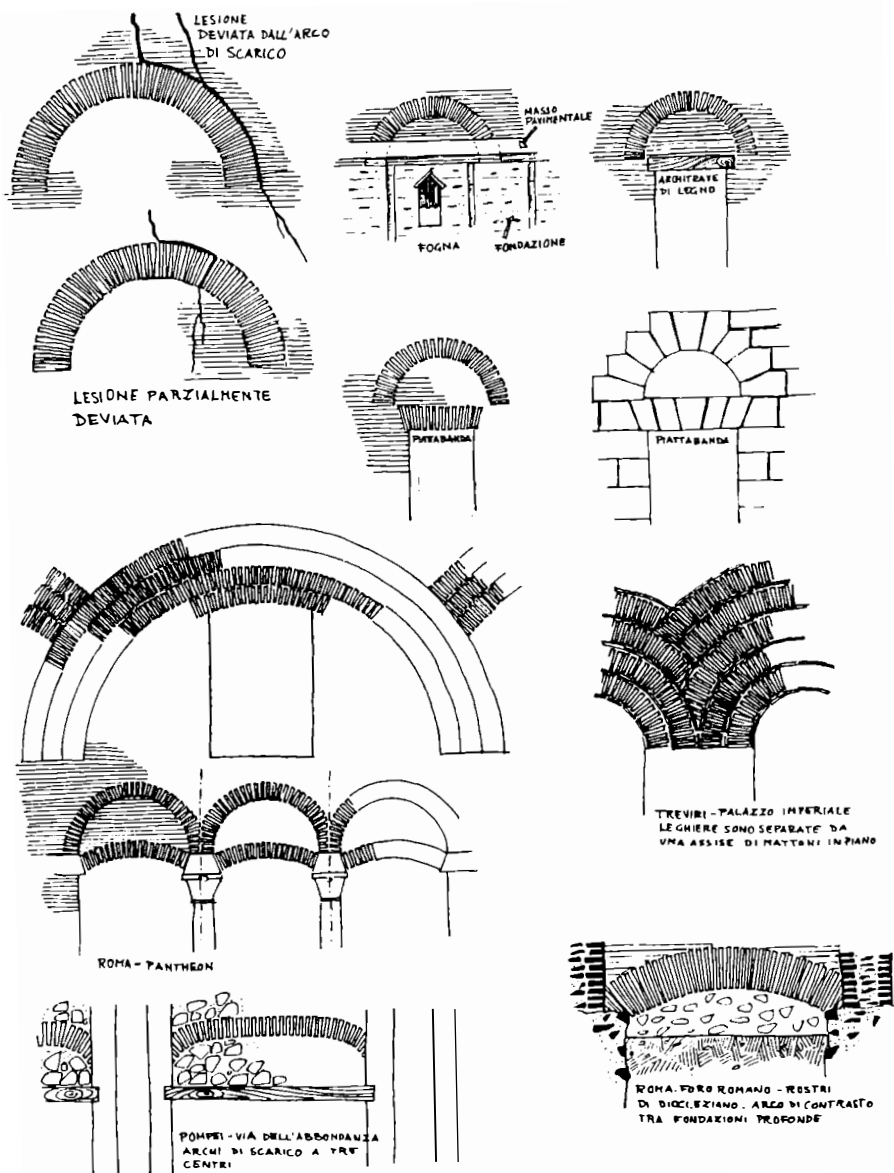
b) che proprio durante la presa il ritiro delle malte provocava microlesioni e lesioni nella struttura;

c) che aggiungendo le lesioni dovute all'assestamento del terreno, ai terremoti ecc., la monoliticità della struttura era sostanzialmente teorica;

d) infine, che basta guardare la deviazione di gran parte delle lesioni in corrispondenza degli archi di scarico per rendersi conto se questi hanno o no funzionato.

ARCO CIECO

Si usò come elemento decorativo in aggetto su una parete piena per articolarne la superficie. In genere si tratta di serie di archi inquadrati da

FIGURA 3.21
Archi di scarico

un partito architettonico formato da mezze colonne o lesene che fanno capo a una trabeazione. Se forse lo scopo primario fu estetico, per movimentare e scandire la lastra/parete su piani diversi, come effetto secondario ne risultò un consistente irrobustimento della struttura.

3.2.2. La piattabanda

Immaginiamo un solido geometrico appoggiato su due piani obliqui, anziché orizzontali come nel caso dell'architrave. Su essi si eserciteranno le forze direttamente connesse al peso del solido (fig. 3.22 dis. 1): in realtà si tratta di un cuneo di foggia particolare. Le componenti orizzontali, uguali e opposte, dimostrano che il solido è soggetto a compressione. Sappiamo che questo tipo di sollecitazione è favorevole alla pietra da taglio in particolare, e ai materiali da costruzione in generale. Se suddividiamo il solido in una teoria di prismi il fenomeno si ripete purché essi siano collocati in modo adeguato. Ciascuno di essi trasmette il peso proprio a quello adiacente e la somma viene scaricata sul piedritto. Questo è lo stesso comportamento statico dell'arco.

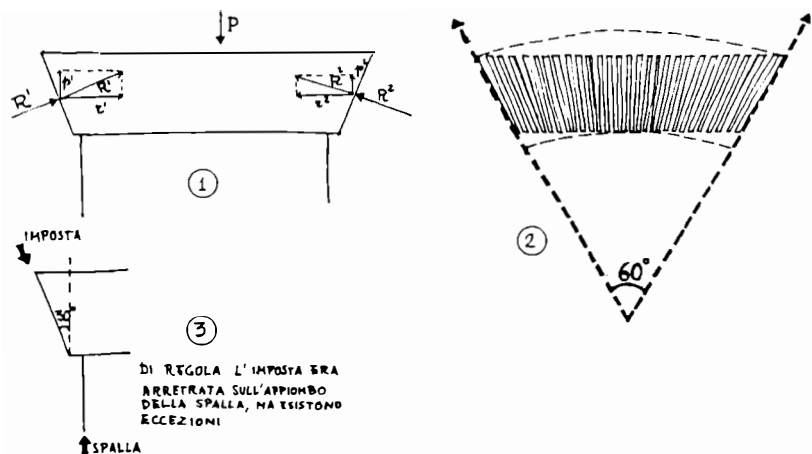
Nella piattabanda i prolungamenti dei giunti convergono in un punto posto al vertice di un triangolo equilatero come nella figura 3.22 dis. 2.

Dunque si tratta di una struttura che dal punto di vista formale è assimilabile all'architrave mentre da quello strutturale appartiene al sistema spingente. Essa può considerarsi derivata da un arco a sesto ribassatissimo tagliato da due piani orizzontali (fig. 3.22 dis. 2). I piani d'imposta dovrebbero formare un angolo di 60 gradi e non passare mai per la intersezione dei piedritti, ma, restandone all'esterno, garantirsi un solido appoggio. Così la regola, alla quale, però, sono frequentissime le eccezioni.

Proprio perché è un arco a freccia nulla, la piattabanda è la più debole delle strutture spingenti e non può essere usata per luci troppo ampie. Gli antichi la impiegarono frequentemente (soprattutto nella forma appena flessa) proteggendola normalmente con un sordino che però non sempre compare (ottagono della Domus Aurea, sostruzione degli Dei Consenti sul Clivo Capitolino ecc.). Come per l'arco, si usò il doppio sistema, a blocchi cuneiformi (anche a martello come nel Teatro di Orange), e in muratura con ghiere di blocchetti e di laterizi (fig. 3.22 diss. 4, 5).

Il tipo adoperato fu quello successivamente detto *all'italiana* con elementi disposti radialmente e concio (o laterizio) in chiave, come da figura 3.22 dis. 6. Solo raramente, e per luci ridottissime, si adoperò il tipo *alla francese* che prevedeva elementi inclinati parallelamente sulle due metà e il giunto in chiave fatto di malta. Il primo sistema obbligava a una maggiore accortezza nell'esecuzione ma dava anche maggiore affidamento. Per tutto quello che s'è detto finora, la parte più sollecitata risultava la spalla, che doveva contrastare sia la spinta orizzontale sia quella verticale. Qui spesso i costruttori romani inserivano un elemento in materiale più resistente alla compressione (fig. 3.23 dis. 1).

Le piattabande ebbero grande diffusione anche al posto degli architravi nelle trabeazioni formalmente canoniche (per esempio: portici del

FIGURA 3.22
Piattabanda

P
IMPOSTA
DI REGOLA L'IMPOSTA ERA ARRETRATA SULL'APPIOMBO DELLA SPALLA, MA ESISTONO ECCEZIONI
SPALLA
60°
TIPI DI PIATTABANDE A BLOCCHI
PIATT. A CONCI CUNEIFORMI
PIATT. A CONCI A MARTELLO
PIATT. A CONCI A BAIONETTA

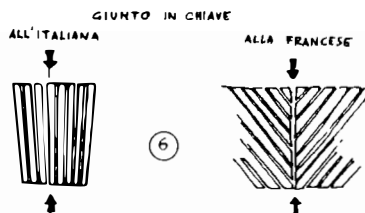
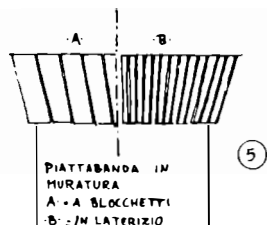
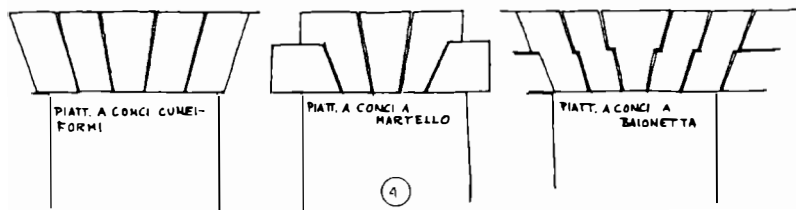
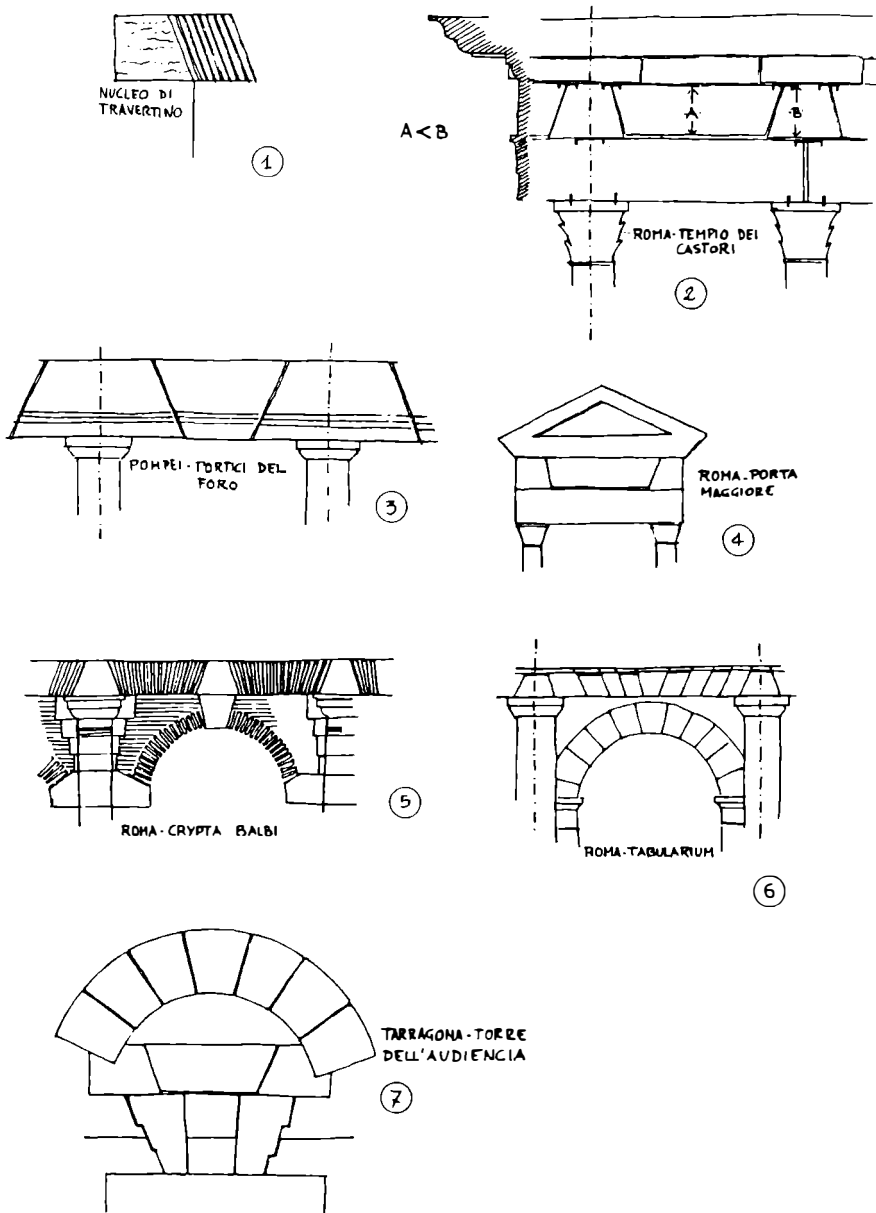



FIGURA 3.23
Piattabanda

Foro di Pompei, sala dei Pilastri Dorici e Teatro Marittimo a Villa Adriana); e da architravi venivano poi mascherate. Ancora più comune fu naturalmente il loro impiego nelle trabeazioni applicate a parete (fig. 3.23).

Qualche volta la piattabanda svolse anche funzione di scarico a protezione di sottostanti architravi come nell'abside del cosiddetto Ippodromo palatino a Roma, o nella trabeazione del tempio dei Castori al Foro Romano. In quest'ultimo caso il blocco di chiave della piattabanda restava sollevato, rispetto al sottostante architrave, per non coinvolgerlo scaricando tutto il peso sui pulvini posti sulla verticale delle colonne.

LA PIATTABANDA ARMATA

È una versione altamente evoluta della piattabanda normale all'italiana attestata su pulvini di pietra posti sulla verticale di colonne o pilastri. Nei pulvini venivano ricavati incassi adatti per alloggiare due o tre staffe di ferro, disposte come nella figura 3.24, che sostenevano la piattabanda vera e propria, opponendosi con grande efficacia, sia per le proprietà meccaniche del metallo sia per la sua collocazione, alle sollecitazioni a trazione cui essa era soggetta nella parte inferiore. Per l'attualità della soluzione tecnica, si confronti la disposizione dei ferri nelle moderne travi di calcestruzzo armato con gli esempi di Villa Adriana (cosiddetta sala dei Pilastri Dorici, Teatro Marittimo; fig. 3.24 dis. 3).

Nelle applicazioni più semplici (criptoportico di Conimbriga in Portogallo) si utilizzava una staffa unica corrente sotto i pulvini e sotto la piattabanda (fig. 3.24 dis. 1).

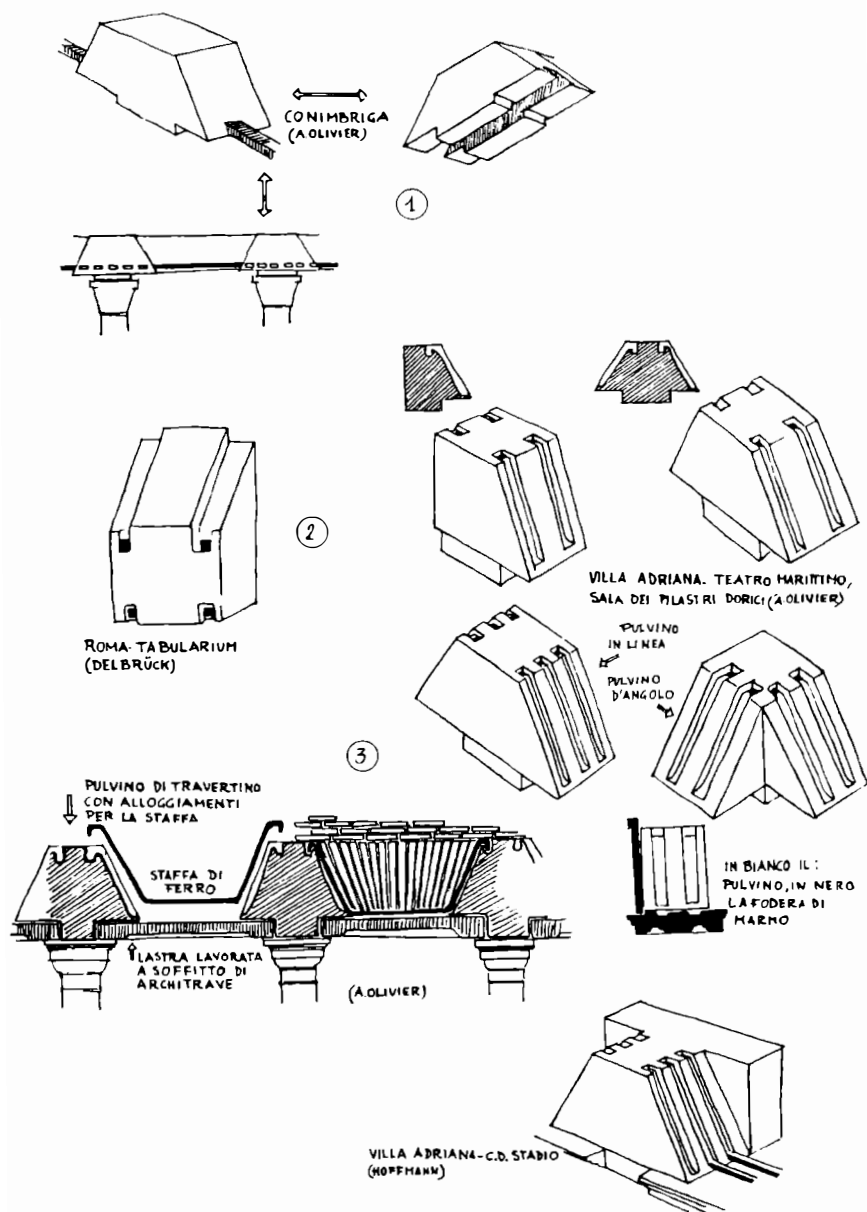
Il caso della piattabanda armata è sintomatico dell'efficacia della logica strutturale per la soluzione di molti problemi architettonici: mentre il riconoscimento del sistema sul piano teorico e storico si è avuto solo nel 1985 (Olivier, Mefra, 1985, pp. 937 ss.), per i mastri muratori che negli anni Cinquanta hanno restaurato il portico del Teatro Marittimo reimpiegando gli elementi antichi la soluzione è stata spontanea.

Un'indagine particolare meriterebbero le piattabande della sala ottagonale della Domus Aurea neroniana, che, sprovviste di arco di scarico, sorreggono con una grande luce le falde della volta e padiglione; è probabile che anche in questo caso si sia fatto ricorso ad armature metalliche interne.

3.2.3. Le volte

La definizione corrente della *volta* è: «struttura di copertura caratterizzata dalla concavità geometricamente definita della superficie interna». Come è evidente, si tratta di una definizione basata soltanto sulle caratteristiche formali, ma non su quelle strutturali, per cui risulta indistinguibile dalla pseudo volta.

Le fonti antiche per indicarla usano i termini *camera*, *camara* (Vitr., 2, 4, 2; 8, 6, 4 ecc.) e *testudo* (Vitr., 5, 1, 10, parla di una volta coperta da un tetto; Nonius, I, p. 58 M). Ma anche questi termini si riferiscono solo alla forma, tanto è vero che vengono usati pure per le strutture "finte" (cfr. par. 3.1.10).

FIGURA 3.24
Piattabande armate

Testudo individua anche il tetto a due o forse meglio a quattro falde, una specie di tribunale, e la copertura di edicole all'interno delle celle dei templi (= *ciborium*; cfr. Castagnoli, 1986, pp. 37-45). È possibile che con questo termine non ci si riferisse a una volta generica ma a una particolare versione, forse quella a padiglione sia perché essa ricorda più da vicino il carapace della testuggine sia perché, soprattutto gli esempi più antichi conservatici, che Vitruvio doveva certamente conoscere, (*Tabularium* e Santuario di Ercole Vincitore a Tivoli), ebbero le falde pressoché rettilinee. Questo fatto facilitò l'uso indifferenziato del termine nella lingua latina per designare il tetto o la volta, entrambi a quattro falde; infatti visti dal di sotto avevano la stessa forma, cambiavano solo la consistenza e la risposta alle sollecitazioni.

Tutti i principi generali enunciati per gli archi sono validi anche per le volte: la differenza sta soprattutto nel fatto che mentre l'arco copre un passaggio, la volta copre un ambiente.

In base alla geometria della forma distinguiamo le volte in *semplici* e *composte*.

1. *Semplici* sono tutte quelle a superficie intradossale continua, prive di angoli e spigoli, forme organiche esistenti in natura e che comunque non hanno bisogno di una elaborazione teorica astratta (figg. 3.25, 3.26).

2. *Composte* sono tutte quelle che hanno la superficie intradossale formata da parti di figure geometriche diverse, il cui incontro dà luogo a spigoli, aggettanti e/o rientranti. In genere queste composizioni per essere pensate hanno bisogno di una base geometrica complessa e di un'elaborazione teorica adeguata, oltre che, ovviamente, di una grande conoscenza della tecnica costruttiva. Ritengo che per questa ragione le volte composte appaiono più tardi di quelle semplici nel panorama architettonico.

A convincersene basterà l'esempio delle crociere e dei padiglioni (fig. 3.26) che palesemente non potevano essere immaginate senza gli studi di Archimede sul calcolo delle aree risultanti dall'intersezione dei solidi cilindrici.

Per i differenti tipi geometrici delle volte semplici e composte converrà rifarsi alle figure citate, se ne ricaverà certo maggior vantaggio che da lunghe descrizioni. Qui varrà la pena di esaminare più da vicino le volte a padiglione e quelle a crociera, tanto per avere una guida.

Per definirle entrambe bisogna partire dalla volta a botte: scomponendola lungo le diagonali (fig. 3.26) avremo quattro triangoli uguali a due a due. Poiché si tratta di parti di una superficie cilindrica, avremo in *B* unghie e in *A* falde: l'unghia avrà per imposta un arco (la direttrice della volta a botte), mentre la falda una retta (la generatrice).

La *volta a padiglione* risulta formata da tante falde quanti sono i lati del poligono di base: sembra che questo tipo sia stato usato prima della crociera, già all'inizio del I secolo a.C. (*Tabularium* e Santuario di Ercole e Tivoli) e impostata con falde su pianta quadrata. Ma quasi subito si

FIGURA 3.25
Schemi geometrici delle volte

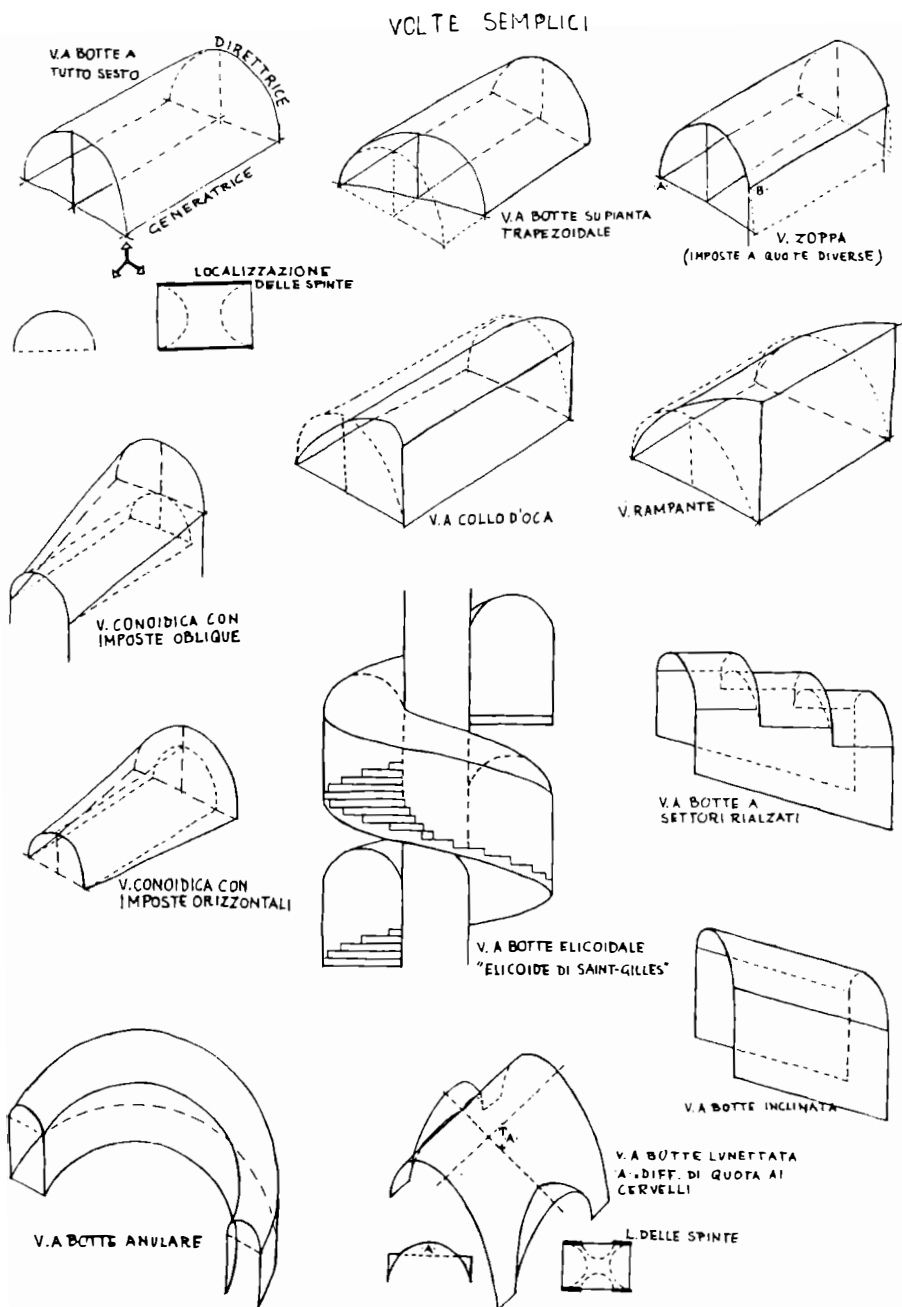
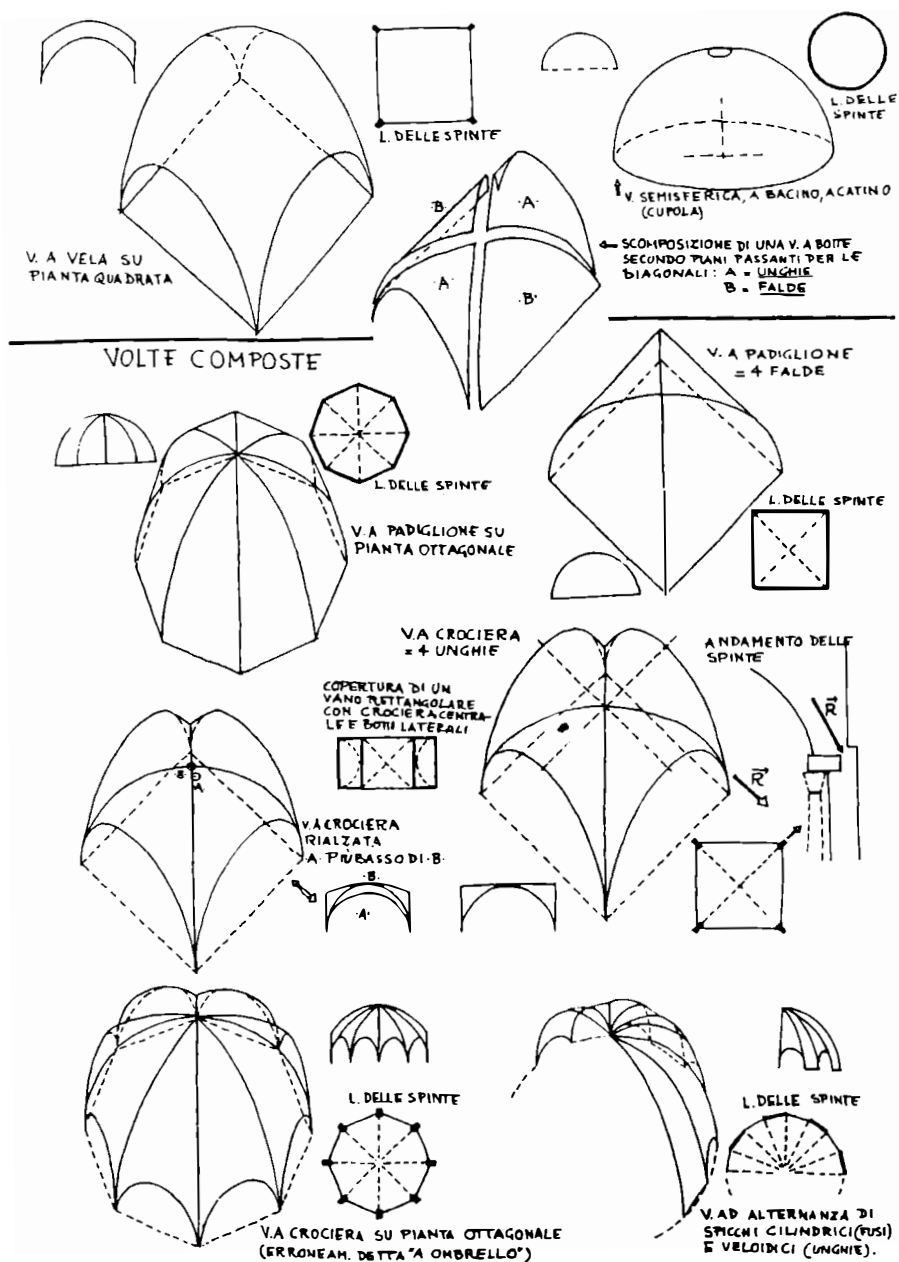



FIGURA 3.26
Schemi geometrici delle volte

affermò come soluzione particolarmente adatta a coprire vani poligonali, soprattutto ottagonali (Domus Aurea, Domus Augustana ecc.) e ormai definitivamente con falde curve.

Quando, come nel Rinascimento, veniva troncata al cervello assumeva il nome di *volta a scifo o schifo*; nei disegni degli architetti di quel periodo si trova designata con questo nome anche la volta a padiglione normale su pianta quadrata, senza troncatura. La volta a botte con testate a padiglione, allora molto diffusa, non mi pare invece che fosse nota nell'antichità, o per lo meno non ne conosco esempi.

Per la sua conformazione, il padiglione trasmette all'imposta un carico diseguale, perché la parte centrale risulta più caricata delle laterali.

La *volta a crociera*, composta da quattro unghie (fig. 3.27), scarica le spinte lungo gli archi diagonali eliminando le tensioni alle linee d'imposta. Nella progettazione bisognava tenere conto di questo comportamento, e articolare di conseguenza le zone angolari; per non squilibrare le spinte si tendeva di norma a coprire con essa vani quadrati o molto vicini al quadrato.

Se gli archi d'imposta erano a tutto sesto, quelli diagonali risultavano leggermente ribassati. Naturalmente però con eccezioni: si usò, per esempio, la pianta rettangolare nella teoria di crociere a copertura dell'aula dei Mercati di Traiano, nella Basilica di Massenzio; più spesso si ritagliava un quadrato al centro del rettangolo, e qui si poneva la crociera; i due rettangoli estremi di risulta venivano coperti ciascuno con una botte, o arcone, più bassa della crociera centrale. Della differenza di livello si approfittava per contraffortare meglio la volta al centro e per ricavare finestre lucifere.

La crociera su pianta quadrata a sezione rialzata non pare che fosse diffusa, mentre l'impiego di unghie, anche sensibilmente rialzate, si ebbe nelle crociere su pianta poligonale, meglio note con il nome improprio di "volte a ombrello".

Per contrastare le spinte diagonali si ricorreva a sistemi diversi: quando il perimetro della volta coincideva con quello delle pareti si irrobustivano gli angoli esterni del vano con pilastri e contrafforti; quando invece i pennacchi poggiavano su mensole all'interno del filo dei muri, non c'era bisogno di altro salvo curare molto la confezione della muratura giacché la spinta era assorbita dagli angoli del vano.

Quest'ultima soluzione spesso era applicata come espediente illusionistico: infatti sia nel caso delle sole mensole, sia in quello delle colonne a esse sottoposte, sembrava che fossero questi elementi a reggere il peso della volta, mentre risultavano entrambi superflui alla statica del sistema. Lo prova il gran numero di crociere, o anche di volte a ombrello che, spogliate delle colonne che un tempo sembravano sostenerle, pure restano perfettamente in piedi.

A ogni modo applicare crociere ristrette rispetto al perimetro del vano si rivelava utile anche per diminuire i vincoli progettuali delle aree angolari esterne.

LE CUPOLE

Il tema rientra in quello più generale delle volte, sia semplici (cupola emisferica, a vela ecc.) sia composte (padiglione su pianta poligonale, volta cosiddetta a ombrello, a spicchi alterni veloidici e cilindrici ecc.). Per i vari tipi si veda la figura 3.26.

Per la particolare forma di questo tipo di volte, qualcuno ha pensato che le cupole a strati orizzontali di conglomerato reagissero come le *tholoi* micenee, e quindi con un comportamento sostanzialmente trilitico. Questo presupponendo sempre la monoliticità della massa muraria dopo la presa. Poiché sappiamo che questa monoliticità è più teorica che reale, l'interpretazione lascia molti dubbi. Più verosimilmente si può pensare che a rendere stabili le volte romane rientrasse anche un maggior valore della resistenza a trazione dei conglomerati.

LE COSIDDETTE NERVATURE

Spesso nelle volte antiche (con minore frequenza in quelle a botte) si riscontrano allettamenti di laterizio disposti secondo i meridiani o i paralleli oppure secondo entrambe le ordinate, o a formare una vera e propria rete (fig. 3.27), e che normalmente vengono definiti *nervature*. Si tratta di un campionario vasto che va dalla realizzazione episodica e puntuale a quella estesa all'intera superficie voltata, sempre però con un aggancio efficace al conglomerato contiguo attraverso l'accentuato frastagliamento dei bordi.

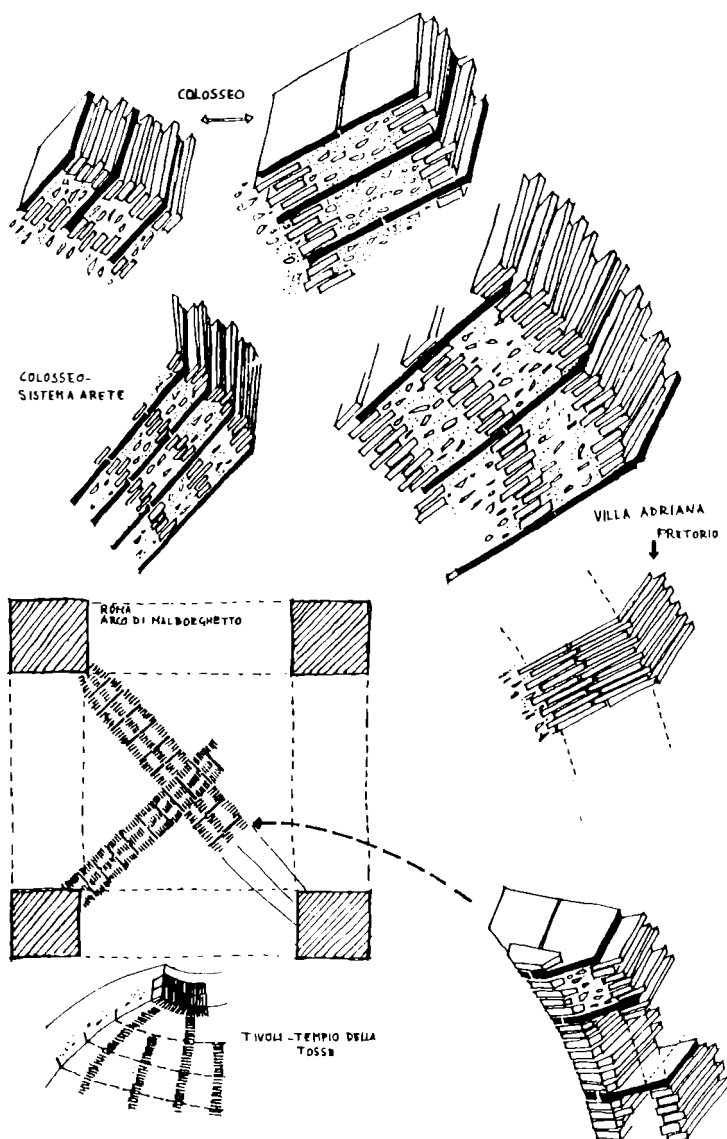
L'irregolarità del *ductus* di ciascun meridiano, che qualche volta si spinge fino al fuori asse totale o addirittura alla soluzione di continuità, si spiega con difficoltà se si ammette che la funzione primaria fosse, come qualcuno sostiene, quella di vere e proprie costolature. Anche l'Alberti (*De Re Aed.*, 3, 14) nota che non tutti gli architetti antichi realizzavano nervature solide e continue, ma piuttosto a questo scopo

> inserivano lateralmente qua e là dei mattoni con le estremità collegate in forma di pettine, quasi che stringessimo le dita della destra con quelle della sinistra. Le zone intermedie venivano riempite con una miscela di calcina e rottami, soprattutto di pomice.

Questi accorgimenti si trovano già nell'architettura del periodo flavio e sembrano interrompersi con Traiano, ma soprattutto con Adriano, per riprendere subito dopo e continuare fino alla tarda antichità.

Con Adriano si usavano più frequentemente fodere di laterizio, e si realizzavano forme voltate di maggiore complessità, in concomitanza con l'uso del miglior conglomerato cementizio mai confezionato. Tutto questo forse non è estraneo all'assenza delle "nervature".

Il significato reale delle "nervature" è comunque controverso e gli studiosi hanno oscillato dall'irrigidimento della centina (Choisy), alla ripartizione delle spinte (Rivoira), dalla volontà di guidare, incassettandola, la massa inerte del calcestruzzo fresco (De Angelis D'Ossat) al raccordo degli strati lungo i meridiani (Cozzo). Altri autori, me compreso,

FIGURA 3.27
Nervature

hanno sostanzialmente aderito a una o più di queste ipotesi senza alcun apporto originale. È vero però che si possono escludere certe letture come quella per cui le nervature, realizzate nella loro interezza prima della gettata del conglomerato, avrebbero permesso di risparmiare le centine (Choisy). Tuttavia ognuna delle altre ipotesi è indotta da una reale funzione, riconoscibile dove con maggiore dove con minore evidenza ma comunque presente nell'organismo architettonico. Il che può anche voler dire che a queste strutture possono essersi attribuite di volta in volta funzioni primarie differenti, legate forse alla matrice geometrica adottata per la copertura massiva, alla qualità o al tipo del conglomerato, alla centina e così via.

È innegabile, per esempio, il ruolo primario delle nervature condotte secondo la direttrice della volta a botte, o per le diagonali della crociera oppure di quelle a rete o di soli meridiani nelle calotte; ma è altrettanto innegabile la polivalenza di queste "nervature", comunque articolate, introdotte nel corpo della volta massiva, che in qualche caso proprio per la loro presenza si assimila a una struttura cellulare. Le superfici delle cellule equivarrebbero a virtuali piani di scorrimento riconducendo la volta nell'ambito delle strutture "a cunei".

I MANTI INTRADOSSALI DI LATERIZIO

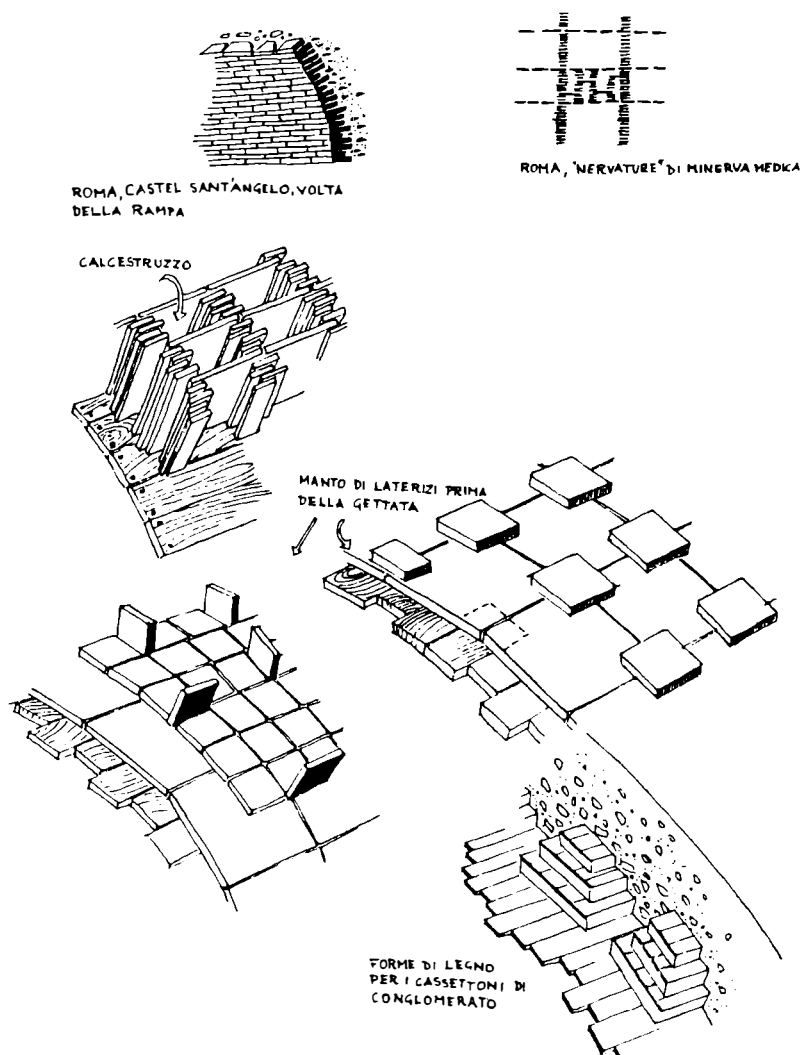
Si è detto della presenza di queste fodere realizzate con uno o, assai più spesso, con due (o anche tre) strati di laterizi diversi (fig. 3.28). Anche qui si è pensato a espedienti per risparmiare il legname della centina oppure creare maggiore aderenza con l'intonaco (Cozzo). Ma il laterizio certo costava più del legname da cantiere e pure l'altra ipotesi va respinta perché proprio Vitruvio (7, 4, 2-3) dice che era necessario un accorgimento (la scialbatura con latte di calce) per far aderire l'intonacatura al laterizio (nel caso specifico le fodere di *tegulae hamatae*) che altrimenti l'avrebbe respinta («*Tum autem calce ex aqua liquida dealbentur uti trullissationem testaceam non respuant: namque propter ieiunitatem quae est a fornacibus excocta non possunt recipere nec sustinere, nisi calx subiecta utrasque res inter se conglutinet et cogat coire*»).

Così, però, come non possiamo escludere una funzione di vera e propria centina per piccole e piccolissime luci (cosa insostenibile per le grandi) non si può neppure respingere quella di una intenzione di integrare la deformabilità della centina lignea.

Anche in questo caso restano aperti interrogativi pesanti come quello posto dalle due ampie crociere contigue delle grandi Terme di Villa Adriana: quella che copre il frigidario ebbe il manto in mattoni ammorsato al calcestruzzo con grande cura, mentre l'altra, ancora parzialmente decorata a stucco, fu gettata direttamente sulla centina lignea.

L'INSERIMENTO DELLE ANFORE NELLE STRUTTURE VOLTATE

La necessità di alleggerire le volte massive spinse anche a mettere nel conglomerato anfore vuote a intervalli o in file continue. La tecnica sem-

FIGURA 3.28
Manti intradossali di laterizio

bra nascesse nelle province africane intorno al II secolo e oltre un secolo più tardi si diffuse modestamente in Italia e a Roma dove si continuò a preferire il sistema del calcestruzzo pieno. Vanno ricordati i casi delle volte del Circo di Massenzio sull'Appia e del Mausoleo di Sant'Elena, detto appunto Tor Pignattara dalle pignatte di cui è fatta la volta, del

padiglione ottagonale a falde rettilinee della torre orientale di Porta Asinaria ecc.

Questo sistema rientra, più che nel desiderio di risparmiare sul conglomerato, nell'esigenza, sempre sentita, di alleggerire le strutture spingenti (si ricordi l'uso della spugna vulcanica attestato già nel I secolo a.C.) e che sfociò poi nella leggerezza delle volte bizantine (cfr., per esempio, i tubuli nella cupola del battistero degli Ariani a Ravenna).

Non va neppure trascurata la funzione di riduzione del periodo di tiro delle malte facilitata dalle sacche d'aria costituite dalle anfore.

3.2.4. Le centine

Per costruire le volte, tanto in blocchi a secco quanto in conglomerato serviva un sostegno temporaneo adeguato: la centina, che poteva essere limitata al solo tempo di costruzione (come nelle volte in blocchi a secco) o restare in opera più a lungo per consentire il tiro delle murature. Dalle fonti letterarie non sappiamo nulla sull'argomento, tuttavia le impronte dei manti di centina, la presenza dei cagnoli o degli alloggiamenti delle traverse per le centine sospese ci provano che il procedimento non era dissimile dal nostro.

La centina, opportunamente sagomata, fissava la curva dell'arco. Siccome la porzione di struttura compresa tra l'imposta e le reni (circa 30 gradi) era sottoposta a un alto coefficiente d'attrito, risultava praticamente in equilibrio, e permetteva, in questo punto, di fare a meno di centine particolarmente robuste. In fondo bastava solo dare la forma. La necessità del sostegno aumentava invece considerevolmente verso il cervello che necessitava di un'armatura particolarmente solida.

Dunque, possiamo definire centina in senso lato qualunque struttura arcuata temporanea, adatta a formare e sostenere l'arco o la volta durante la costruzione. Le centine nell'edilizia romana erano sostanzialmente di due tipi: di legno (di gran lunga le più frequenti) e di terra (sporadiche).

CENTINATURA DI LEGNO

Con il termine centina in genere si indica l'intera armatura, ma in realtà esso individua solo la parte arcuata, sorretta e irrigidita da diversi elementi (puntelli, cunei, ganasce, braghe, saettoni ecc.) e unita ad altre centine da un tavolato disposto secondo la linea generatrice della volta. Questo tavolato si chiama *manto della centina* (fig. 3.29).

La funzione ne fa intuire la delicatezza e la cura necessaria nella scelta del legname (stagionato e il più possibile privo di nodi) e delle maestranze che dovevano realizzarla. L'insieme dell'armatura lignea era infatti una macchina, che funzionava in tempi ristretti e in condizioni sfavorevolissime perché sottoposta a regime di sollecitazione e di umidità incostanti.

Si potevano verificare:

a) deformazioni elastiche e plastiche del materiale sottoposto a carico;
b) serrarsi dei giunti dei singoli elementi per effetto del carico e per l'aumento di volume del legno bagnato;
c) variazioni igrometriche e termiche del legname.

Tutto questo provocava, anche nei casi più fortunati, un calo del cervello della struttura definitiva rispetto al sesto dell'arco progettato. Il fenomeno era da attribuirsi anche all'assestamento conseguente al *disarmo* (= smantellamento della centina) che entrava in combinazione con la prima causa.

Siccome il fattore di calo al cervello non era quantificabile in anticipo con precisione bisognava procedere per approssimazione. Nel senso che, volendo ottenere un profilo intradossale il più vicino possibile al sesto pieno, si doveva assegnare alla centina un valore di freccia superiore da 1/80 a 1/200 rispetto al risultato che si voleva. È proprio per questo fenomeno (o perché forse non si prendevano provvedimenti adeguati) che la grande maggioranza delle volte romane a tutto sesto, a una misurazione accurata, risultano invece leggermente ribassate e con profilo che tende al policentrico.

Il tipo di centina variava a seconda della struttura da realizzare, della collocazione dell'edificio, delle necessità di cantiere ecc. Per questo si dividono in due grandi categorie: quelle *fisse a terra* e quelle *a sbalzo*. Le prime, evidentemente le più sicure e comunque meno impegnative nella realizzazione, erano più ingombranti e non sempre applicabili (si pensi, per esempio, a un ponte); le altre erano più comode (anche perché lasciavano liberi i passaggi a livello del piano di cantiere), ma molto più impegnative da costruire (figg. 3.29 e 3.30).

La costruzione delle strutture voltate procedeva in parallelo alle imposte verso la chiave che era messa in opera per ultima. Il procedimento comportava una dilatazione dell'armatura di verso contrastante con quello appena descritto. Infatti la centina, caricata alle reni, tendeva ad alzarsi in chiave conferendo poi alla struttura massiva un profilo irregolare. L'inconveniente era eliminato, o almeno corretto, sfruttando la superficie corrispondente al cervello della centina come deposito di materiali da costruzione. Così si teneva la centina caricata omogeneamente e si contrastava efficacemente la spinta alle reni.

Sappiamo che negli archi di grande spessore, quando la costruzione era arrivata grosso modo al giunto alle reni e si passava dal regime autoportante a quello di carico accentuato, poteva verificarsi una lesione che andava ricucita, oppure, come si vede in tante costruzioni, si evitavano archi troppo spessi sovrapponendo più armille di cui ciascuna era sostegno alla soprastante.

Durante la costruzione dell'arco, quando con la muratura si era arrivati alla metà della monta in genere era necessario (o comunque prudente) rimettere in tensione la centina battendo sugli appositi cunei. Qualunque fosse il tipo di armatura adottato un accorgimento era fisso: doveva essere concepita in modo che il disarmo potesse avvenire riducendo

FIGURA 3.29
Centinatura in legno

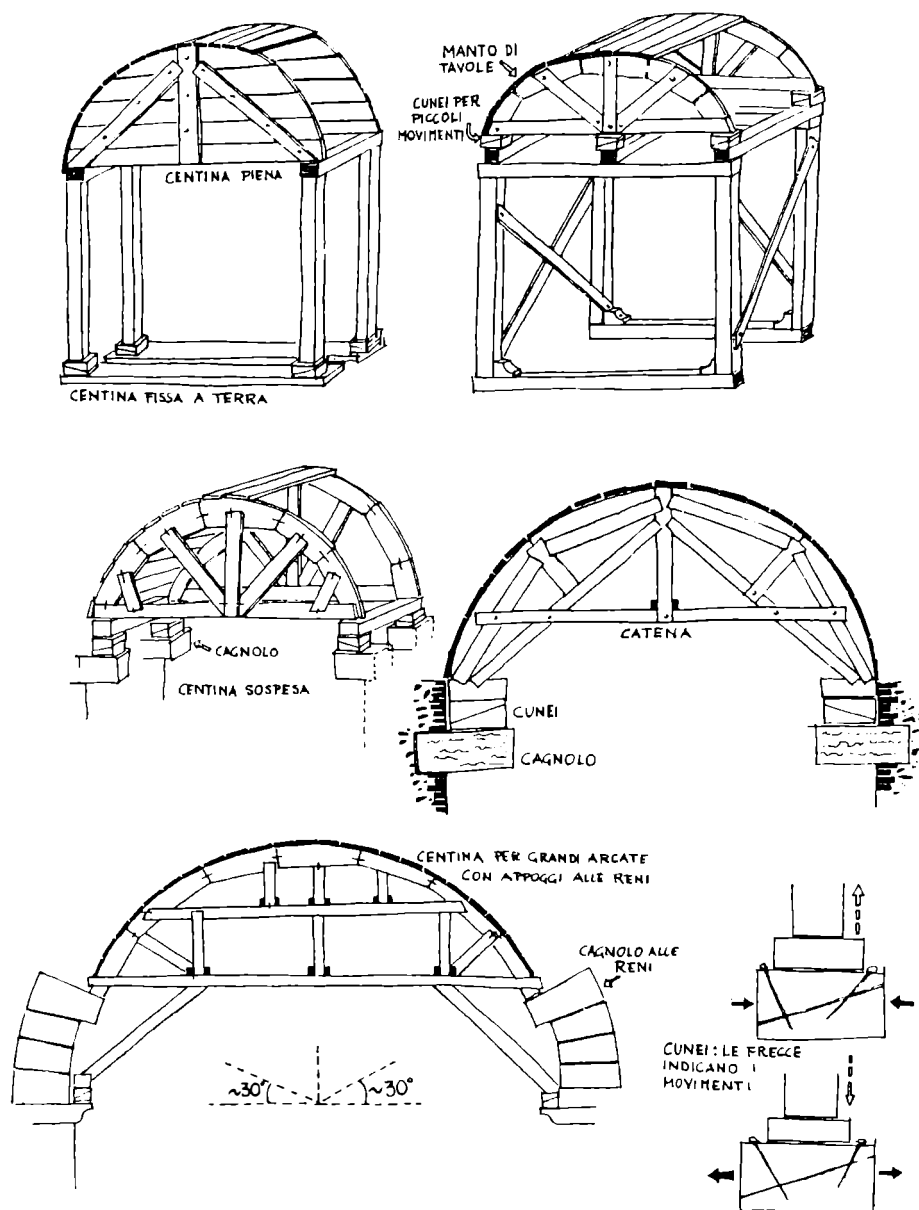
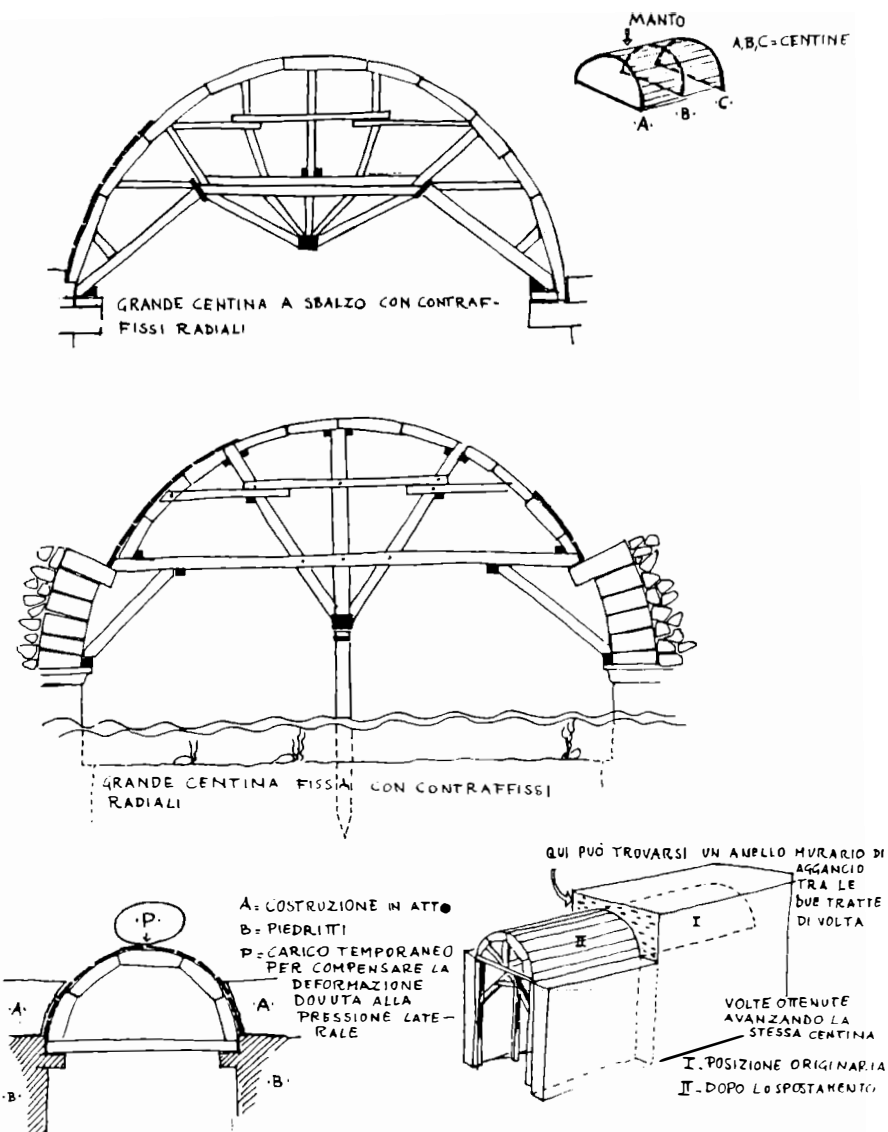



FIGURA 3.30
Centinatura in legno

al minimo gli squilibri e le spinte sugli elementi stessi dell'arco e sui piedritti. La condizione migliore si aveva quando la centina era indipendente dalla struttura muraria (centina a terra), cosa questa che, come s'è visto, non succedeva sempre.

Nel disarmo occorreva la massima cautela e quindi si doveva avere la possibilità di far fare alla centina piccoli movimenti così che se la volta non avesse retto, anziché crollare, si sarebbe appoggiata di nuovo sul manto consentendo di prendere i provvedimenti adeguati. Questi piccoli movimenti erano permessi dall'inserimento nei punti opportuni, di coppie di cunei di legno forte sovrapposti in modo che, fatti scorrere lungo il piano inclinato di aderenza, aumentavano o diminuivano lo spessore del loro insieme innalzando o abbassando tutto quello che vi insisteva sopra (fig. 3.29).

I ritti, cioè i puntelli verticali, non poggiavano mai direttamente sul terreno perché, potendo facilmente penetrarvi, avrebbero reso instabile l'intero sistema: così venivano posti su una tavola di legno forte oppure su un blocco di pietra che allargando l'appoggio consentiva di ripartire il carico. Questi ritti hanno spesso lasciato impronte nei sottopavimenti quando questi erano gettati prima del disarmo delle volte.

Le centine a sbalzo poggiavano sulla costruzione stessa per mezzo di sedi incavate oppure mensole (cagnoli), in cui, o su cui, venivano alloggiati i puntoni o le traverse della centina (fig. 3.30). In qualche caso si disponevano anche blocchi aggettanti dal profilo d'intradosso all'altezza delle reni (28-30 gradi circa) per coadiuvare gli appoggi dell'armatura (che però in questo caso doveva essere costruita in più tratte).

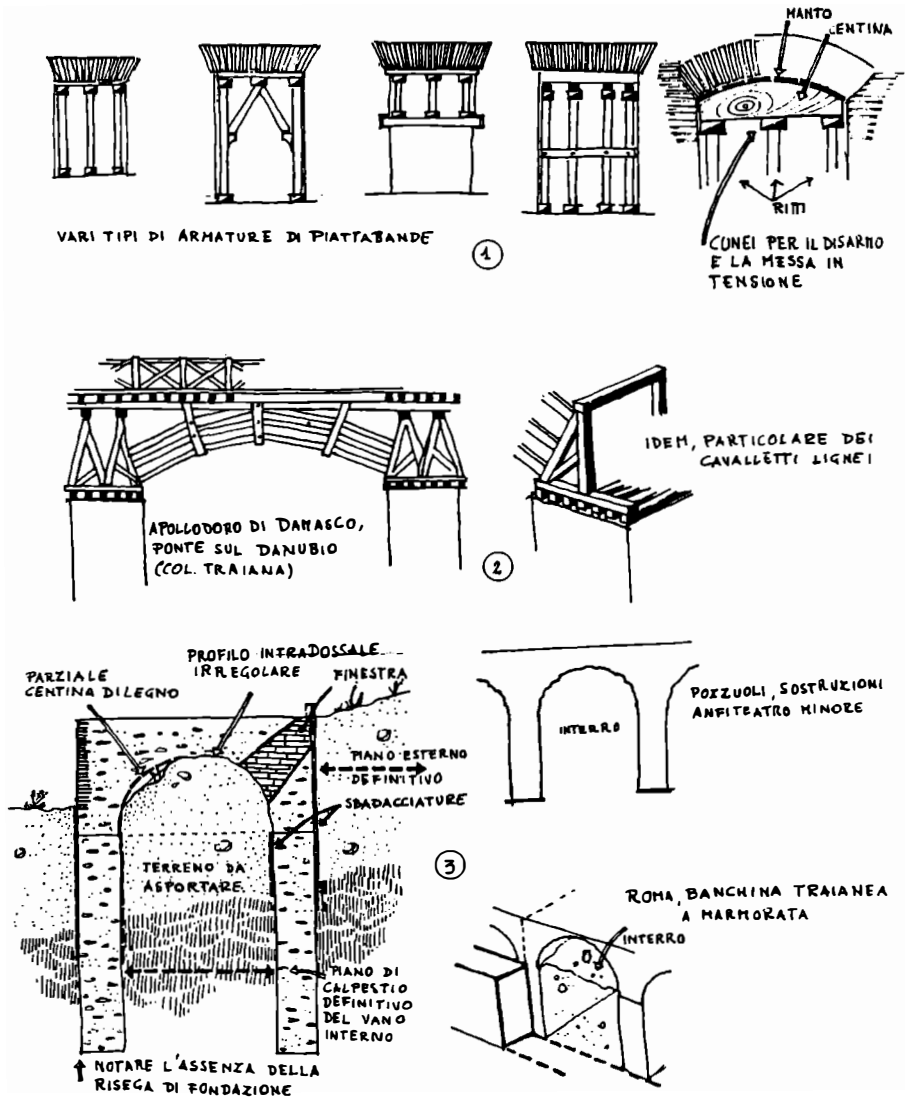
I cagnoli dopo il disarmo potevano essere scalpellati via, se richiesto da motivi estetici, oppure lasciati in opera come in tanti ponti stradali e di acquedotti, per essere riutilizzati in caso di restauri.

Quando una struttura arcuata superava i 3 m di luce i problemi aumentavano scalarmente, soprattutto se la volta era massiva, quindi molto pesante. Quanto maggiore era le spazio da coprire, tanto più complessa diventava la struttura lignea di sostegno: le singole centine spesso superavano, per complessità, impegno e costi le capriate di grande luce.

Per fortuna, però, dato il comportamento statico delle strutture arcuate, le gettate potevano essere fatte a settori (a seconda naturalmente della forma geometrica della volta) avanzando progressivamente lo stesso settore di centine (fig. 3.30). La grande esperienza dei costruttori romani, del resto, consentì di realizzare archi larghi anche 2 soli metri per una luce di 25 (Pont du Gard; questo sistema ad archi affiancati fu seguito anche da qualche ingegnere medievale, per esempio, Ponte di Avignone e della Vieille Brionde, 54 m di luce).

Alla stessa categoria delle centine di grande impegno appartengono in fondo i ponti lignei come quello sul Danubio (fig. 3.31 dis. 2) fatto costruire da Traiano e formato da centine triplici collegate e poggiate su cavalletti impostati su *pilae* in muratura.

Sulla base di queste considerazioni è evidente anche la necessità del-

FIGURA 3.31
Altri tipi di centine

l'armatura lignea per la costruzione delle piattabande, anche se in questo caso, trattandosi di una struttura rettilinea, non si potrà parlare di centina in senso proprio (fig. 3.31 dis. 2).

CENTINATURA A BAULE DI TERRA

L'uso di gettare volte su masse di terra appositamente sagomate a baule era noto ai romani, ma applicato solo sporadicamente. Su questo deve essersi formata la leggenda popolare per cui prima di gettare la volta del Pantheon fu ammucchiato un gran cumulo di terra, dopo aver depositato un tesoro al centro dell'edificio. Quando, ultimata la cupola, si trattò di svuotare la costruzione, si dette libertà al popolo di farlo con il diritto, per chi l'avesse trovato, di appropriarsi del tesoro, risparmiando così tempo, fatica e denaro. Si tratta, come è evidente, di una fantasticheria basata però sulla conoscenza dell'uso del sistema della centina a baule di terra.

Diversi edifici ce ne mostrano l'applicazione: l'esempio tipico è la cosiddetta Basilica Neopitagorica di Porta Maggiore, o anche la prima fase del criptoportico centrale della Domus Tiberiana, i cassoni della ripa traianea a Marmorata, i cunei dell'anfiteatro minore a Pozzuoli ecc. Il sistema lascia delle tracce inequivocabili ed è per lo più relativo a strutture destinate a restare interrate o non praticabili (il che non esclude che in una seconda fase possano essere state frequentate), oppure a edifici che per giacitura, come in alcuni rari criptoportici, offrivano questa come la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista economico.

Naturalmente il sistema presentava seri inconvenienti: prima di tutto, quando il baule di terra non era di riporto ma realizzato direttamente nel terreno naturale, non c'era la possibilità di ricavare la risega di fondazione, per cui, dopo aver svuotato il vano, mancava l'ampliamento del "piede" della costruzione sul piano fondale. Inoltre la compressibilità disomogenea del terreno provocava forti irregolarità nella superficie intradossale, anche quando, totalmente o parzialmente, si ricorreva a manti di tavole poggiati sulla terra con l'intenzione di garantirsi un profilo più regolare (fig. 3.31 dis. 3) e quindi una stabilità opinabile quando si trattava di sfruttare il vuoto interno, cioè di far lavorare la volta come tale. Evidentemente diverso era il caso in cui il vano interno rimaneva interrato e la terra, almeno parzialmente, continuava a svolgere la sua funzione di centina.

L'edilizia romana si distingue per l'uso generalizzato, almeno nell'Italia centrale, di centine di tavolato di cui restano quasi sempre le impronte nell'intradosso. Le incannucciate, le stuoie o i materiali inerti come sabbia e pozzolana, sovrapposti al manto di tavole, sono invece particolari di epoche assai più vicine a noi.

C'è chi sostiene per l'architettura romana anche l'uso di centine di laterizi per sostituire, o almeno alleggerire, quelle lignee (cfr. par. 3.2.3).

In qualche caso, con origine, sembra, africana, si incontrano centinature leggere di tubuli di terracotta applicate però anche qui a gettate di scarsissimo impegno (vedi, per esempio, i corridoi dei servizi delle terme nella Villa di Piazza Armerina).

4

Strutture di alzato

Sicuramente già nel I secolo a.C. i costruttori avevano affrontato, e in gran parte risolto, i difficili problemi delle strutture a grande sviluppo verticale. E questo non tanto negli organismi ad alta specializzazione, tipo torri e fari – per i quali si hanno esempi già in epoche molto più antiche (Faro di Alessandria, per esempio, da 120 a 135 m di altezza, costruito fra il 300 e il 280 a.C.) –, quanto in quelli di uso civile come le abitazioni multiple. In età tiberiana il Celio era ormai saturo di costruzioni residenziali molto alte. Valerio Massimo (8, 2, 1) cita: «*Claudius Centumalus ab auguribus iussus altitudinem domus suae, quam in Caelio monte habebat, summittere, quia his ex arce augurium capientibus officiebat, vendidit eam Calpurnio Lanario*» (cfr. anche Cic., *De Officiis*, III, 66).

Del resto sappiamo che l'altezza delle *insulae* (nell'accezione di edifici con numerosi appartamenti su più piani e negozi al piano terreno, non diversamente dai nostri palazzi) fu in un primo tempo stabilita per legge a un massimo di 18 m e successivamente ridotta a 16, il che fa oscillare il numero dei piani tra 4 e 5.

Lo sviluppo in elevato dell'insula era favorito dalla sua stessa concezione, basata su tre principi fondamentali:

a) facciata principale su strada fornita di negozi, finestre, balconi e accessi principali ai piani superiori;

b) facciate secondarie su cortili o giardini o vie secondarie;

c) mancanza di specifica caratterizzazione della funzione e della disposizione dei vani perché i singoli inquilini potessero stabilirne l'uso liberamente.

Famosa fu l'*Insula Felicles*: «*insulam Feliculam credas tanta tabulata caelorum nescio ubi illic etiam Valentinianorum deus ad summas tegulas habitat*» (Tertull., *Adv. Valent.*, 7).

Comunque accanto a queste strutture tecnicamente avanzate sopravviveva, come del resto accade ancora oggi, un gran numero di case private abbastanza fragili (cfr. Strabo, *Geogr.*, 5, 3, 7, p. 325; 14, 4, 4, p. 370; Sen., *Contr.*, 2, 9; Tacit., *Hist.*, 1, 86; Dio Cass., 39, 61).

4.1. Il muro/parete

La parte di costruzione compresa tra il piano di spiccato e la copertura e formata da strutture murarie assimilabili a lastre (muri o pareti), e da tutti gli elementi di connessione, scale, solai ecc. rientra nella definizione di alzato dell'edificio.

Già l'uso dei termini *parete* o *muro* stabilisce la posizione concettuale con cui affrontiamo il problema.

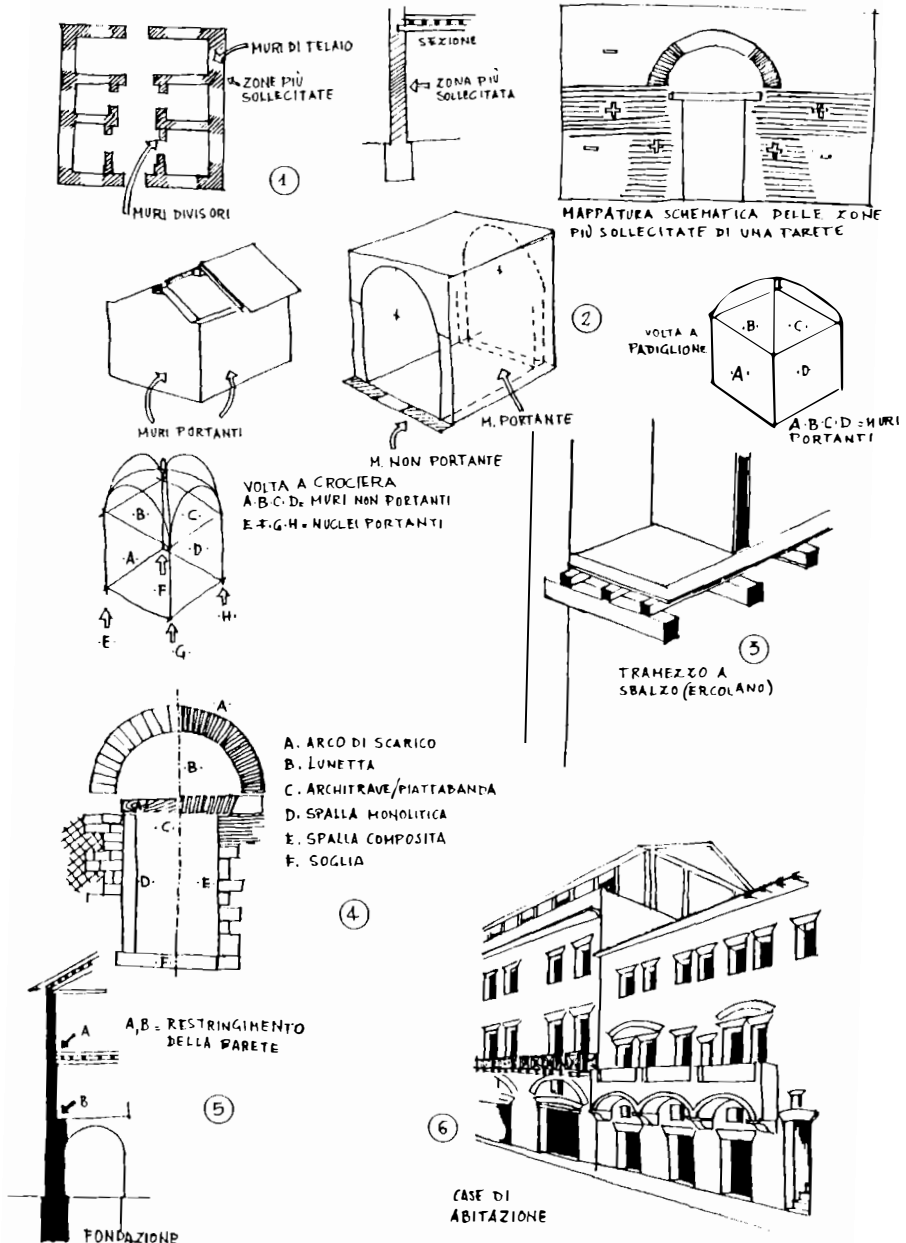
La parete suggerisce piuttosto la superficie che delimita lo spazio, un ostacolo all'andare orizzontale; il muro quella del solido resistente di sostegno alla copertura, secondo una direzione verticale. Un'evocazione di decoro nel primo caso, di resistenza nel secondo.

I romani, grazie alla qualità dei calcestruzzi, realizzarono murature con rapporto spessore/altezza veramente eccezionale: a Villa Adriana, ad esempio, ce ne è uno (sopra il cosiddetto Stadio) con rapporto 1:16, mentre il muro del Pecile supera l'1:11 (m 0,75 × 8,30 × 214): in realtà data la riduzione di sezione a m 0,35 per tutta la lunghezza, esso si è trovato, fino al restauro del 1988, a lavorare per lungo tempo in un rapporto dimensionale superiore a 1:23. Le formule più ardite per le murature ordinarie ancora nell'Ottocento consentivano proporzioni 1:12, senza però garantire una stabilità prolungata.

Si è già detto dello stretto rapporto tra tipo di copertura adottato e spessore, scelta dei materiali e modalità di confezione delle murature. I muri si dividevano in due grosse categorie: di *telaio* (esterni) e *divisori* (interni), cfr. figura 4.1 dis. 1. I primi, per la posizione, erano soggetti a sollecitazioni maggiori ed esposti a più facili danneggiamenti da parte delle intemperie; nel costruirli perciò si prendevano provvedimenti che, però, non sempre oggi risultano riconoscibili. La differenza infatti poteva consistere anche solo nella qualità del pietrame del conglomerato, nella scelta della calce per la malta, del dosaggio più economico, nell'impiego del "laterizio dolce" anziché di quello "forte" (cfr. par. 7.2.2) per le strutture laterizie, e così via. E la differenza non si ferma qui. All'interno del muro vi è, come giustamente rilevava l'Alberti, un'ossatura con funzione particolarmente resistente e, una parte, che si può definire di "tamponamento", con compiti resistenti meno accentuati (fig. 4.1 dis. 2). Per un esempio ricordiamo il diverso compito che hanno i pilastri, gli angoli, le colonne, gli stipiti, gli archi, gli architravi ecc., che sono l'ossatura, rispetto a quello della parete piena.

Così, è facile immaginare quante e quali differenze possono risultare all'analisi minuta e ravvicinata delle diverse strutture di un edificio e quanto sia facile scambiarle, se e quando notate, per "fasi costruttive". Lo studio dei monumenti antichi è disseminato di questi equivoci.

Ma torniamo al problema. Per ossatura intendiamo dunque tutte quelle strutture che sopportano il carico delle altre, destinate a funzioni diverse, e lo trasmettono alle fondazioni; per tamponature intendiamo i collegamenti strutturali tra gli elementi ossaturali, e, infine, per tramezzature le separazioni tra vani con poco o nessun valore di vincolo statico. Semmai si può riconoscere a esse una funzione di irrigidimento nel

FIGURA 4.1
Muri e pareti

caso di organismi a solai di legno. Solo i tramezzi potevano essere costruiti a sbalzo, cioè fuori della verticale delle strutture sottostanti (fig. 4.1 dis. 3), tutte le altre strutture dovevano essere centrate su quelle inferiori: in genere, infatti, il muro al terzo piano è il coronamento di una parete che parte dal piano fondale e attraversa in verticale tutto l'edificio. Raramente, quasi sempre in occasione di ristrutturazioni, e sempre in organismi voltati nei quali si prendevano speciali provvedimenti, troviamo muri a sbalzo.

Vitruvio (6, 8, 1 ss.) a questo proposito dice:

> Se ci sono vani nel sottosuolo e cantine a volta le fondazioni devono essere più ampie delle strutture che si trovano nelle parti superiori dell'edificio. Le pareti, i pilastri, le colonne debbono essere collocate con il centro sull'asse di quelle inferiori in modo che corrisponderanno alla parte solida [nucleo d'inerzia]. Perché se il peso delle pareti divisorie o delle colonne si trova a cadere su spazi aperti queste non reggono a lungo. Inoltre se le finestre e le porte verranno provviste torno torno di telaio resteranno integre, perché quando gli architravi delle porte e le travi sono caricate di muratura si flettono al centro e provocano lesioni di assestamento; ma quando al di sotto saranno stati collocati i telai ben inzeppati questi non consentiranno alle travi di assestarsi e di danneggiare la struttura soprastante. Si deve anche cercare di alleviare il peso della muratura per mezzo di archi [di scarico] con i loro conci rastremati e i giunti diretti verso il centro. Perché, quando questi archi sono proiettati oltre i limiti della trave e dell'architrave, prima di tutto il legno sollevato dal peso non si fletterà, poi, se deperisse, col tempo si potrà sostituirlo con facilità senza bisogno di puntellarlo.
>
> Poi, quando gli edifici poggiano su pilastri e gli archi sono fatti con conci a cuneo orientati al centro, i pilastri terminali debbono aggettare per maggiore ampiezza, così da essere forti e resistere quando i conci pressati in basso dal peso della muratura, a causa delle loro connessioni, tendono a scendere al centro mentre alle imposte spingono all'esterno. Perciò, se i pilastri angolari sono di dimensioni ampie, freneranno la spinta e daranno stabilità agli edifici.

In più si raccomanda di fare grande attenzione a che ogni parte dell'edificio mantenga il proprio appiombo (6, 8, 5).

Come ogni struttura anche l'alzato era sollecitato e quindi doveva essere progettato di conseguenza. È nota l'insistenza di Vitruvio (cfr. par. 7.4) sulla necessità di costruire pareti omogenee e non composte di "tre croste verticali", di evitare pareti di mattoni crudi inferiori ad un certo spessore, e di ricorrere a un'ossatura portante di blocchi di pietra e a "tamponature" intermedie che, combinate con solai sovrapposti, consentivano quell'edilizia intensiva imposta dalla penuria di aree edificabili in Roma.

Sul tema della struttura interna della parete è molto più utile il testo dell'Alberti (*De Re Aed.*, 3, 8) che dimostra una maggiore chiarezza di idee rispetto allo stesso Vitruvio.

> Sarà bene fabbricare l'involucro esterno con pietra più dura [il principio vale anche per le cortine in laterizio] perché tutto l'edificio abbia lunga durata. Del resto in tutte le parti del tamponamento non importa molto il tipo di muratura impiegato, sia pure reticolato o incerto, come si preferisce, purché all'assalto pericoloso e alla molestia del sole e dei venti, e magari al fuoco e alla brina, si

contrapponga un genere di pietra che a tali pericoli resista nel modo migliore. È da usare materiale robustissimo specialmente là dove una maggiore quantità di pioggia precipitando da grondaie e gocciolatoi, è sbattuta dal vento contro il muro: il che si può vedere spesso nelle antiche costruzioni, dove perfino il marmo risulta, per dir così, mangiato e corroso completamente [...]. Da parte nostra abbiamo osservato che tutti gli edifici già crollati perché decrepiti, avevano cominciato a vacillare dalla parte di Austro [meridione]. La ragione di ciò sta probabilmente nel fatto che la violenza del calore solare, mentre l'opera era ancora in buono stato, fece seccare anzitempo gli umori della calce; inoltre i muri, indeboliti dal fatto di essere continuamente inumiditi dal soffiare d'Austro e poi bruciati dalle vampe del sole, finirono per deteriorarsi. Ecco perché, per difendersi da questi ed altrettanti pericoli, si deve impiegare materiale resistentissimo. Una regola fondamentale da osservare una volta iniziato un filare di pietre, esso va poi proseguito nell'intera costruzione, uguale e senza varianti, evitando che in una parte la struttura consti di pietre grandi, in un'altra di pietre piccole. Dicono infatti che essa, coll'aggiungervi ulteriore peso, si comprime, e la calce, premuta mentre sta seccando, fa minor presa; donde conseguono lesioni nel muro. Sarà lecito invece fabbricare l'involucro interno, insieme con tutta la facciata della sua parete, con pietra più tenera. Ma qualunque tipo di pietra sia impiegato di dentro e di fuori, l'involucro è da fabbricare in modo che si estenda verticalmente seguendo in modo esatto la linea che gli è propria: la quale è parallela al perimetro della pianta, e in ogni sua parte non deve assolutamente sporgere né rientrare né serpeggiare, dev'essere insomma diritta, continua e definita [...].

Vi sono due tipi di riempimento: l'uno è quello che viene introdotto nello spazio vuoto tra gli involucri, e consta di conglomerato; l'altro consta di pietre ordinarie ma rozze, e in questo caso più che riempire si dovrebbe dire costruire. È chiaro che l'uno è l'altro tipo sono escogitati a scopo di risparmio, dal momento che a fare questa parte di muro si destina qualsiasi pietra piccola e rozza: perché certo nessuno si sarebbe risolto di propria iniziativa a ricorrere a pietre piccole o a scaglie se vi fosse stata abbondanza di pietre grandi e squadrate.

Le ossature si differenziano dalle parti di tamponamento soltanto in ciò: che in queste ultime lo spazio tra gli involucri viene riempito con qualsiasi genere di pietre e frammenti vari in modo pressoché disordinato e casuale, mentre nelle ossature non si introducono mai, o solo raramente, pietre di forma irregolare, ma esse vengono costruite come muratura ordinaria in tutto il loro volume, anche nella parte interna. Del resto, per avere la maggior durata possibile, sarebbe meglio che l'intera parete fosse riempita del tutto, e a tutti i livelli, con pietre squadrate.

Ad ogni modo, qualunque sia il materiale pietroso con cui si decide di colmare lo spazio tra gli involucri, si deve fare il possibile per disporlo su filari ordinati e ben bilanciati. Del pari sarà utile far attraversare lo spessore del muro tra un involucro e l'altro da un certo numero di pietre ordinarie, non troppo distanti tra loro, per tenere collegati insieme gli involucri stessi e per evitare che il materiale di getto, una volta introdotto nel muro, possa far pressione sulle pareti degli involucri.

Del resto l'importanza di legare i tre elementi del muro (due cortine e un nucleo) fu sempre avvertita. Bisogna dire però che di tutte le culture edilizie quella greca, e soprattutto quella romana, vi hanno posto maggiore attenzione.

Per l'ambiente romano le stesse pietre usate, tanto artificiali quanto naturali, hanno sempre mostrato una generica forma a cuneo, massima

nel reticolato e nel laterizio, minima, ma presente, nell'incerto e nella struttura a blocchetti come nel listato. Questo attenuava di molto l'effetto delle tre lastre verticali.

A partire dal XVI secolo, quando tornò in uso la cortina laterizia in vista, sul modello estetico delle antiche fabbriche romane, si usarono mattoni rettangolari (misure medie m 0,26 × 0,13 × 0,03/0,035) invece che triangolari o a trapezio, il che favorì di nuovo l'assetto a due giunti verticali, che, se sollecitati, tendevano ad aprirsi. A meno che non si alternassero fittamente i mattoni disponendoli di testa e di taglio, cosa, questa, che gli imprenditori erano molto restii a fare (lo dimostrano gli edifici) per risparmiare sul materiale.

Come s'è detto, l'inconveniente era quasi completamente eliminato nelle cortine antiche dalla forma a cuneo e dalla smartellinatura dei lati interni dei singoli elementi. L'azione legante della malta era ulteriormente favorita dall'alternanza dei giunti, e quindi dalla disposizione dei cunei interni, sulla verticale.

La prova della risoluzione del problema nell'edilizia antica è data dal fatto che tranne nei casi, purtroppo frequentissimi nell'opera laterizia, in cui l'asportazione delle cortine è stata fatta a scopo di recupero, essa sopravvive. Raramente si riscontrano distacchi di cortina per cause meccaniche interne alla struttura stessa. Anzi, spesso si vede che, dove il laterizio è stato recuperato, le code dei mattoni restano nel nucleo murario, a provare la raggiunta omogeneità del muro.

La saldezza della parete poteva essere raggiunta per vie diverse: agendo sulla qualità dei materiali e sulla loro disposizione, inserendovi un'ossatura resistente, oppure, aggiungendo corpi esterni quali gli speroni e i contrafforti.

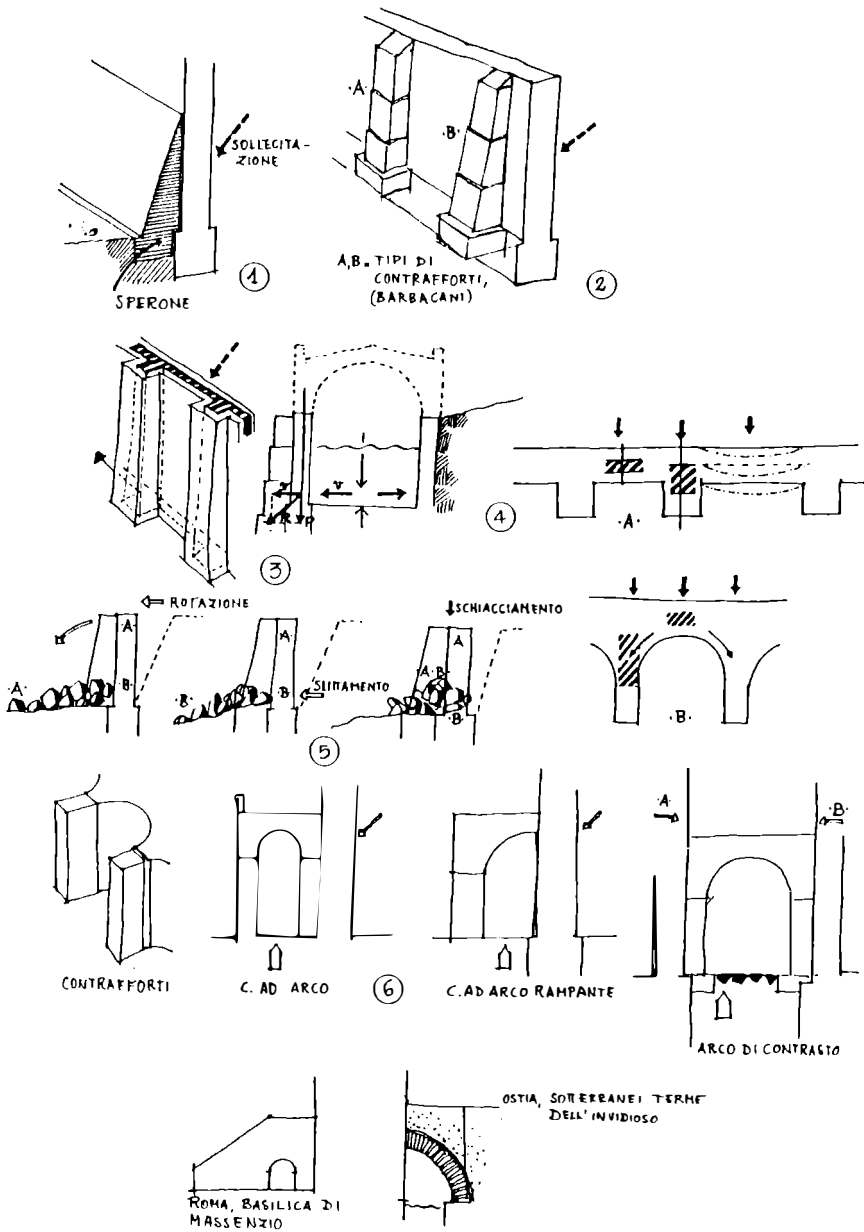
Essi quando erano previsti dal progetto, risultavano integrati organicamente con le strutture contraffortate, se invece erano applicati in un secondo tempo, rivelavano con chiarezza la loro natura di "intrusi".

Quest'ultimo caso poteva dipendere sia da dissesti statici di varia natura, sia dalla previsione di un aumento o cambiamento di direzione delle sollecitazioni originarie (ristrutturazioni, sovrapposizione di carichi, passaggio da coperture lignee a coperture voltate, orientamento diverso delle generatrici delle volte in caso di rifacimenti parziali o totali ecc.).

È intuibile che mentre nel primo caso gli speroni erano chiamati a lavorare subito, nel secondo si faceva affidamento anche sulla possibile riserva di stabilità. Nel senso che la struttura aggiunta poteva entrare in funzione anche "se" le sollecitazioni lo avessero reso necessario.

4.2. Speroni e contrafforti

La tecnica più diffusa per integrare la capacità resistente di una struttura fu quella di addossare *speroni* (muri continui dal profilo a scarpa, fig. 4.2 dis. 1) o *contrafforti* (elementi distanziati) anche perché era quella più spontanea e intuitiva. In parallelo si svilupparono organismi di contraffortamento molto complessi sfruttati anche a fini estetici (cfr., per

FIGURA 4.2
Speroni e contrafforti

esempio, le sostruzioni del Santuario di Ercole Vincitore a Tivoli, o quelle di tante ville, fig. 4.2 dis. 2; figg. 4.3-4.6).

La loro funzione era di reagire alle sollecitazioni trasmes e dalla parete. Facciamo il caso che questa fosse sollecitata in modo che la risultante delle forze tendesse a uscire dal nucleo d'inerzia. Per ristabilire l'equilibrio si doveva allargare il piede del muro fino a ottenere un nucleo d'inerzia capace di contenere quella risultante (è il caso dello sperone). Siccome la spinta era obliqua lo sperone poteva essere profilato a scarpa così da risparmiare muratura ed evitare nello stesso tempo pericoli di strapiombo.

Nel caso invece di elementi isolati (fig. 4.2 dis. 4) l'ampliamento del nucleo d'inerzia era limitato alla larghezza del contrafforte mentre nello spazio intermedio la tendenza restava quella di uscire dal terzo medio. A questo punto tuttavia l'intero sistema si comportava come una combinazione di mensola (perché incastrato a terra) e di architrave (perché la parete si appoggiava ai due contrafforti) e restava in equilibrio per la capacità di reazione elastica del materiale stesso (purché i contrafforti in serie non fossero distanziati più dell'altezza del muro da sostruire).

Per gli esempi di dissesto da rotazione, slittamento e schiacciamento cfr. figura 4.2 dis. 5.

Nei sistemi di contraffortamento rientrano anche quelli ad arco che si dividono a loro volta in due tipi:

a) contrafforti forati da un arco per consentire il passaggio, quando il rapporto vuoto/pieno è decisamente a favore di quest'ultimo (Basilica di Massenzio, terrazza superiore di Palestrina, portico della Domus Flavia, Tempio di Giove a Terracina ecc.);

b) veri e propri "archi di contrasto" quando il rapporto è contrario (arco tra il Tempio di Saturno e la Basilica Giulia, archi della Via Nova, archi esterni della grande Aula dei Mercati di Traiano), figura 4.2 dis. 6.

Meno usati, ma tuttavia esistenti, gli archi rampanti, adoperati – insieme a quelli a collo d'oca – a sostegno di rampe di scale, ma anche con vera e propria funzione di contraffortamento (Terme dell'invidioso a Ostia) o di sostruzione (volta del Corridoio degli *Hospitalia* a Villa Adriana).

4.3. Le sostruzioni

Il termine (latino: *substructio*) non va confuso, come spesso accade, con "fondazione" (latino: *fundamentum*, CIL, X, 5837, 5838, la struttura; *fundatio* il farla). *Substructiones* sono le strutture fuori terra – quindi di alzato – costruite in terreno declive per realizzare un piano orizzontale a una quota stabilita (fig. 4.3). Come esempio si ricorda l'iscrizione del *Tabularium* di Roma, nella quale Q.L. Catulo «*substructionem et tabularium de s[enatus] s[ententia] faciundum coeravit eidemque probavit*» CIL, I_2, 736 e 737 = VI, 1313 e 31597).

Proprio per questo motivo la sostruzione era una struttura squilibra-

FIGURA 4.3
Sostruzioni

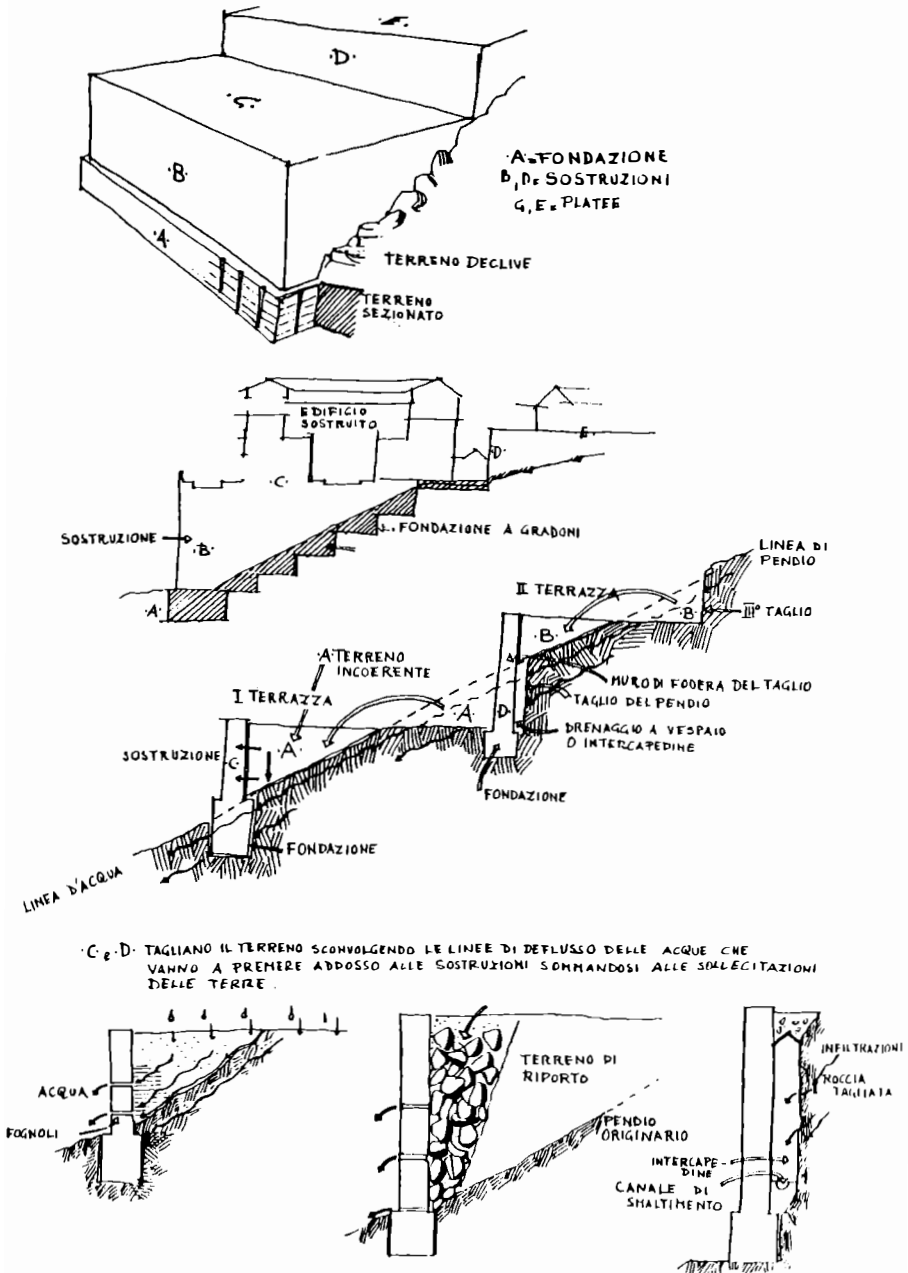
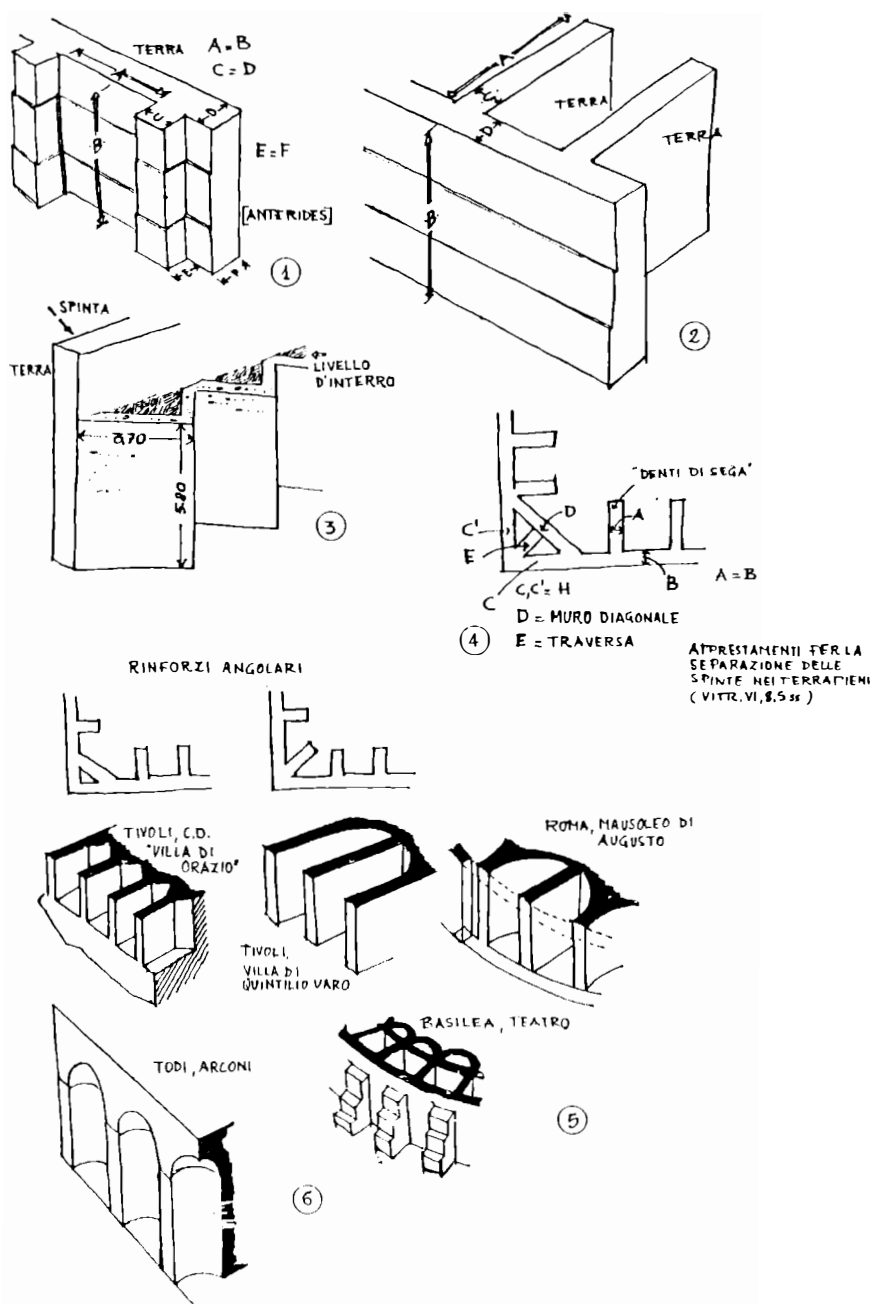



FIGURA 4.4
Sostruzioni

ta, nel senso che aveva una fronte a valle molto alta, e una a monte praticamente al livello del terreno, mentre i raccordi laterali avevano il profilo verticale triangolare. Questo comportava delle spinte oblique sulla parete a valle, obbligando a speciali accorgimenti sia per rendere resistente il muro, sia per imbrigliare o contenere la massa di terra più o meno umida che premeva alle spalle e che variava in peso e volume a seconda delle stagioni.

Vitruvio (6, 8, 5 ss.), in questo confermato da molte e complesse testimonianze materiali, prova che il problema era ben noto ai costruttori. Egli afferma infatti:

la massima cura si deve avere nelle sostruzioni perché la terra accumulata contro di esse provoca grandi danni. Essa infatti non mantiene lo stesso peso che ha d'estate ma d'inverno si gonfia assorbendo acqua dalla pioggia. Di conseguenza con l'aumentare il proprio peso e il proprio volume, si dilata e spinge in fuori le pareti di contenimento. Per evitare questo inconveniente bisogna fare come segue: lo spessore della muratura deve corrispondere a quello della terra che si mette alle spalle. Quindi muri di sostegno [*anterides*] e contrafforti [*erismae*] devono essere eseguiti contemporaneamente. L'intervallo tra di loro deve essere pari all'altezza delle sostruzioni ed il loro spessore allo spessore di quelle. Al piede debbono aggettare in armonia con la profondità della sostruzione e poi gradualmente assottigliarsi in modo che alla sommità sporgano tanto quanto sarà lo spessore della parete [a quella quota]. Inoltre, all'interno, contro terra, il muro di sostruzione deve avere degli aggetti come i denti di una sega tali che si approfondiscano nel terreno della misura pari all'altezza della sostruzione. Lo spessore del dente deve essere come quello del muro principale. Agli spigoli estremi della sostruzione poi, prendendo una distanza dall'angolo interno pari all'altezza del muro, segnamo un punto su entrambi i lati e costruiamo una parete diagonale tra di essi e dal centro di questa tireremo un muro fino all'angolo interno di quello principale. I denti ed i muri diagonali non consentiranno alla spinta di gravare tutta sulla sostruzione ma la distribuiranno attenuandola. [Cfr. fig. 4.4 dis. 4].

Qualcosa va detto a proposito delle *anterides* (Vitruvio 6, 8, 6); esse sono state riconosciute in quelle fondazioni con schema planimetrico basato sul triangolo trovate nell'area della cosiddetta Biblioteca di Augusto sul Palatino (fig. 4.4 dis. 3; cfr., anche, Carettoni 1983, p. 15). Di esse sembra che non sia mai esistito un alzato. Vitruvio, d'altra parte, parla di contrafforti esterni a una sostruzione e di essi dice che sono distanziati della misura pari all'altezza del muro che rinforzano (mentre le fondazioni del Palatino sono continue) e di essi fissa anche la larghezza, pari allo spessore della sostruzione. Si tratta dunque di normali contrafforti del tipo "barbacane": l'equivoco ha origine dal termine *serratim*, che Vitruvio usa riferendosi però a strutture interne alla sostruzione (6, 8, 7), e che il testo chiarisce trattarsi di *singuli dentes*, cioè di muri isolati di briglia al terreno. *Serratim* vale quindi in senso generico come *pectinatim*, termine usato per indicare una cadenza ritmica di strutture e non una loro forma precisa.

È lo stesso Vitruvio a specificare l'equivalenza tra *serratim* e *pectinatim* quando (1, 5, 7) parlando delle fondazioni delle mura dice: «*cum*

FIGURA 4.5
Sostruzioni cave

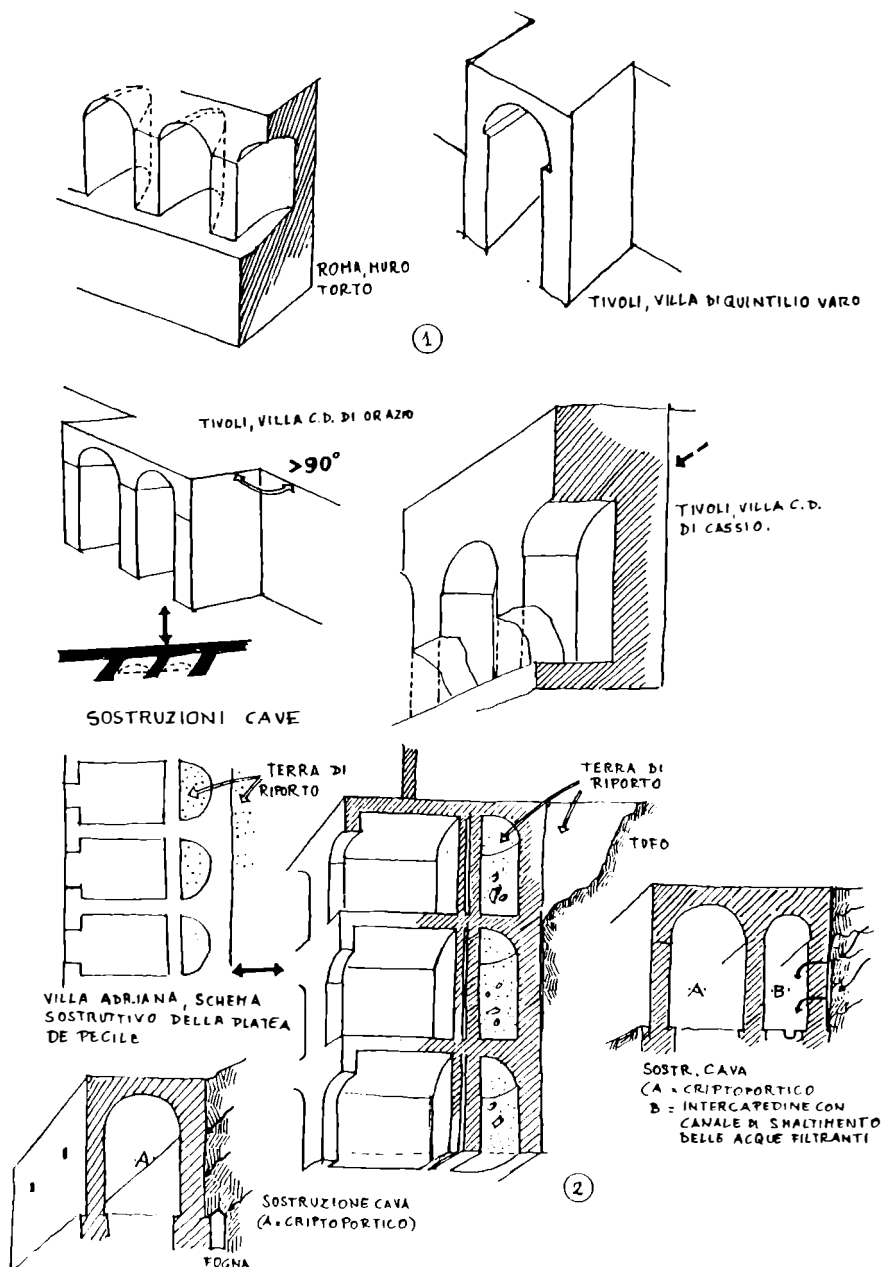
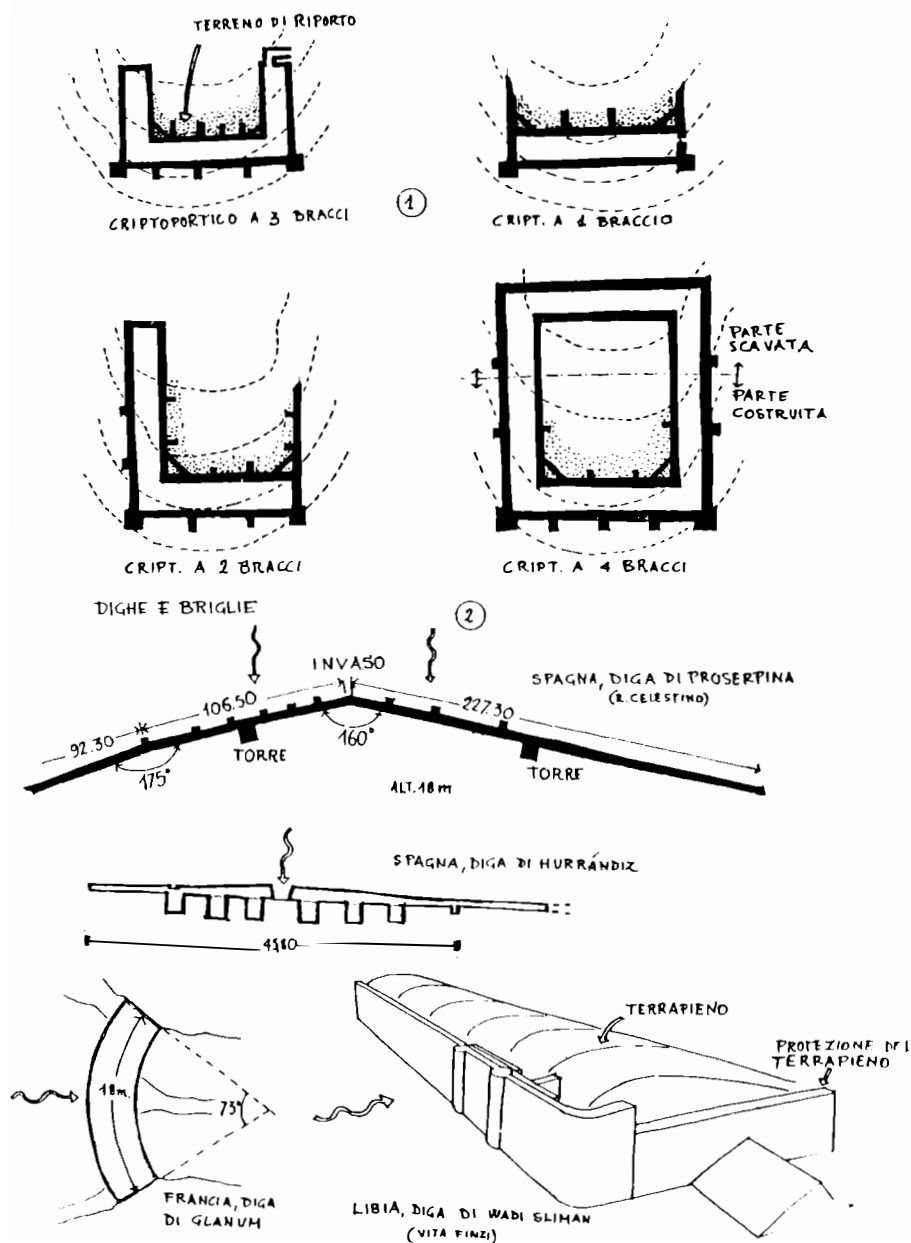



FIGURA 4.6
Criptoportici sostruttivi, dighe e briglie

autem fundamenta ita distantia inter se fuerint constituta, tunc inter ea alia transversa, coniucta exteriori et interiori fundamento, pectinatim disposita quemadmodum serrae dentes solent esse conlocetur». Con lo stesso senso Plinio (*N.H.*, 8, 30, 37) riferisce *pectinatim* alla disposizione dei denti degli squali.

Vitruvio, dunque, si occupa solo della sostruzione "piena", in cui la parte dominante è svolta dal terreno più o meno imbrigliato da setti murari. Essi erano collegati tra loro praticamente solo sulla fronte, ed erano privi di una copertura autonoma che li separasse dal piano soprastante.

Un altro sistema, assai antico, era quello delle due pareti collegate da setti murari a pettine: ne risultava una teoria di "scatole" che venivano riempite con sabbia o terra costipata: questo procedimento non differisce molto da quello descritto da Vitruvio.

Un tipo di sostruzione altrettanto diffusa, se non di più, e del quale Vitruvio non parla, fu quello "cavo", in cui la funzione resistente era affidata a un organismo complesso articolato in stanze coperte da volte massive (fig. 4.5 dis. 1).

La frequentabilità o meno dei vani è ininfluente per la definizione. Essi d'altronde, pensati come cassoni chiusi, possono nel tempo essere stati aperti e usati, come successe per il *Tabularium*.

Il tema della sostruzione cava dette luogo, a partire almeno nel II secolo a.C. (si pensi alla doppia rampa frontale del santuario superiore di Palestrina), a una grande varietà di soluzioni dovute al carattere di progettualità molto spinta dell'architettura romana; una varietà tale da rendere inutile persino di parlare di tipologia.

Alle sostruzioni forse dovremmo collegare anche le dighe e le briglie idrauliche (fig. 4.6 dis. 2): opere in cui i romani hanno mostrato di essere esperti se, tanto per fare un esempio, l'ultima delle dighe che crearono i laghetti del *Sublaqueum Neronis*, a Subiaco appunto, ha resistito, praticamente senza manutenzione, fino al 1305, quando una piena eccezionale ricordata dalle cronache la travolse. Sembra che avesse un'altezza di circa 40 m con uno spessore di 14 m e fosse coronata da una strada ponte.

Queste strutture si possono considerare delle sostruzioni esasperate perché soggette a forti escursioni delle sollecitazioni, con in più la necessità di accorgimenti che evitassero il "troppo pieno", cioè una spinta eccessiva dell'acqua.

Lo spessore dei muri in questi casi era molto variabile, comunque normalmente superiore a quello stabilito dalla tecnica moderna. La rastremazione delle sostruzioni oscillava infatti da 1/5 a 1/20 dell'altezza: essa in genere si otteneva con riseghe e piani inclinati piuttosto che solo con questi.

5

Fondazioni

La fondazione raccoglie il peso dell'intera struttura e lo trasmette al terreno nel modo più uniforme possibile e in misura compatibile con le capacità portanti di questo, così da assicurare all'edificio la massima stabilità per un periodo di tempo indeterminato. Le sue caratteristiche dipendono da un lato da quelle del fabbricato e dall'altro dalla *capacità portante* del terreno, cioè dalla sua attitudine a sopportare i carichi e naturalmente cambia col variare dei tipi di terreno (fig. 5.1).

Le fondazioni sono limitate in basso dal *piano di appoggio* e in alto dal *piano di spiccato* che le divide dall'alzato ed è marcato dalla *risega di fondazione* (fig. 5.2).

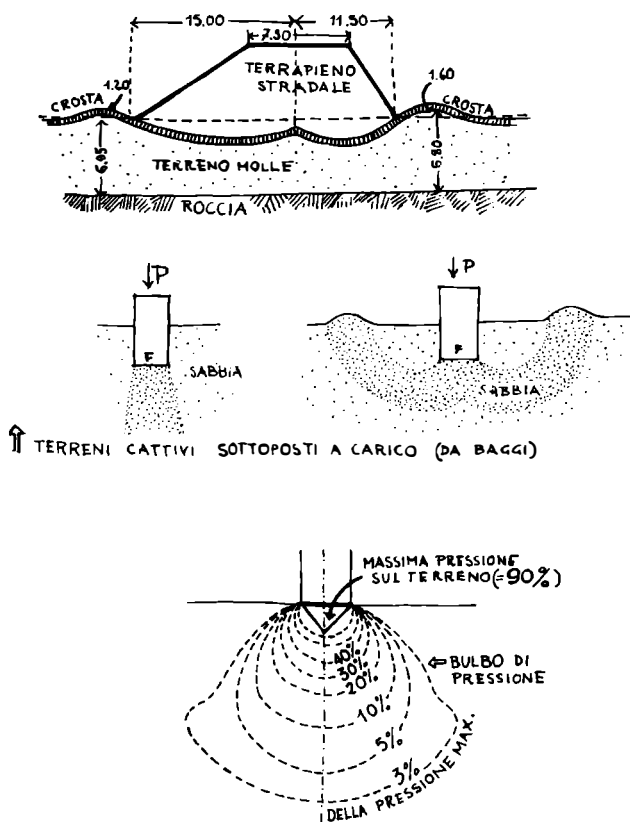
Vitruvio assegna a questa risega un valore pari alla metà dello spessore dell'alzato diviso tra i due lati, ma, come spesso accade per le sue indicazioni, raramente nella realtà si incontra tale rapporto.

Questa parte dell'organismo costruttivo ha da sempre costituito un problema: basterà citare due notizie. Tacito (*Ann.*, IV, 62-63) racconta il crollo di un anfiteatro avvenuto nel 27 d.C. a Fidenae presso Roma:

> L'anno del consolato di M. Licinio e L. Calpurnio [appunto il 27] [...] un tale Atilio, figlio di un liberto, che aveva preso a costruire un anfiteatro per celebrare uno spettacolo gladiatorio non ne poggiò le fondamenta su terreno solido né collegò la struttura lignea di elevato con salde connessioni. E questo perché non era motivato né da una ricchezza adeguata, né dalla lodevole ambizione del cittadino, ma solo da indegna sete di guadagno.
>
> Siccome il posto era vicino a Roma, vi accorse una grande folla di appassionati – uomini e donne di ogni età – a cui all'epoca di Tiberio era proibito assistere a tali spettacoli. Così la strage fu maggiore; infatti la costruzione, sovraffollata, crollò, parte all'interno e parte all'esterno travolgendo gli spettatori e le persone che erano nei pressi dell'anfiteatro. Ci furono 50.000 tra morti e feriti.
>
> Subito dopo un decreto del Senato proibì a chiunque avesse meno di 400.000 sesterzi di rendita e non dimostrasse di costruire su un terreno di provata solidità, di organizzare spettacoli gladiatori. Atilio fu mandato in esilio.

Anche Suetonio (*Tib.*, 40) conferma la gravità della tragedia (cita i soli morti in numero di 20.000; cfr., anche, Suet., *Calig.*, 31 e Oros., 7, 4, 11).

L'altra notizia è tratta da una lettera di Plinio il Giovane (*Epist.*, 10, 48) scritta quando era governatore della Bitinia per Traiano:

FIGURA 5.1
Reazioni del terreno soggetto a carico

Sire, il teatro di Nicea, in avanzata costruzione ma ancora non ultimato, ha assorbito, e ritengo inutilmente, già 10 milioni di sesterzi. Infatti la struttura cede e si divide per ampie lesioni tanto per la umidità e mancanza di solidità del terreno, quanto per la qualità del pietrame poco compatto e scarsamente resistente. La situazione è tale da far considerare di lasciarlo com'è o abbatterlo completamente dato che tutti gli interventi di consolidamento [verosimilmente sottofondazioni e speroni] risultano più costosi che efficaci.

Egli aggiunge poi che tutte le altre opere progettate (basiliche circostanti e portico in *summa cavea*) erano state rinviate *sine die* per sospensione dei lavori.

Si tratta, come si vede, di due edifici per spettacolo, che quindi prevedevano un grande carico dinamico (oggi diremmo "folla assiepata e

saltellante") e che pertanto richiedevano cure particolari nella realizzazione.

Nel primo caso la costruzione, che almeno nelle sovrastrutture era in legname, doveva essere fondata in area alluvionale in prossimità del Tevere, e nel secondo caso, l'edificio, tutto di muratura, era collocato su un terreno ugualmente infido presso il lago Ascania. Comunque la causa dei dissesti fu riconosciuta dai contemporanei nel terreno inadatto, ma soprattutto nella inadeguatezza del progetto e dell'esecuzione dei lavori.

5.1. I tipi di terreno

In base alla capacità portante il terreno si divide in quattro tipi stabiliti sulla base della pratica dei costruttori:

1. *Terreni ottimi*: capacità di carico oltre 30 kg × cmq. Banchi consistenti di rocce compatte che non poggino su materiali incoerenti e abbiano giacitura orizzontale. Per dare un'idea concreta della capacità di carico si pensi che per un valore di 30 kg a cmq si ha un carico di 300 tonnellate per mq il che vuol dire un pilone di travertino a sezione quadrata di 1 m, dell'altezza di 120/136 m (l'oscillazione è dovuta al variare del peso specifico del travertino).

2. *Terreni buoni*: capacità di carico da 3 a 5 kg × cmq. Terreni semirocciosi, banchi di sabbia, ghiaia, argilla asciutta. Purché la loro potenza sia superiore a 2/4 m e non vi siano azioni di corrosione superficiali o sotterranee, né scorrimenti laterali. In questo caso il pilone di travertino dell'esempio precedente si riduce a 20/22 m di altezza.

3. *Terreni mediocri*: capacità di carico da 1 a 1,5 kg × cmq. Sono i banchi misti di argilla e sabbia, argilla umida, rocce in decomposizione. L'altezza del pilone di travertino si riduce a 6,80/6,00.

4. *Terreni cattivi*: capacità di carico inesistente senza provvedimenti di consolidamento fondale. Si tratta di terreni di riporto, torbosi, paludosi, sciolti ecc. Di solito non sopportano fondazioni più impegnative di quelle necessarie a semplici muri di cinta.

5.2. Lo scavo delle trincee

Il problema principale era quello di appurare la qualità del terreno e di stimarne le capacità portanti. In assenza dei moderni carotaggi si doveva ricorrere al sistema empirico in uso fino a qualche decennio fa. Definita l'area e tracciato a terra il perimetro delle strutture da realizzare, bisognava scavare pozzi agli angoli fino a raggiungere un terreno che si riteneva solido: poi si lasciava cadere dall'alto un masso di almeno 10 kg. Se esso rimbalzava sul fondo della fossa con suono secco significava che il terreno era adatto, se il suono era sordo, e il sasso affondava anche per poco, bisognava approfondire lo scavo. Individuata così la quota utile, si scavava l'intera trincea.

Il consistente margine di incertezza del sistema è bene espresso dal

FIGURA 5.2
Tipi di fondazioni

detto riportato dall'Alberti (*De Re Aed.*, III, II): «scava fino a trovare il duro e che il cielo ti assista».

Accertata l'idoneità del fondo si procedeva all'apertura delle trince. A questo punto s'incontrava la prima difficoltà: quanto maggiore era la profondità da raggiungere in terreno poco coerente, tanto aumentava il rischio di frana delle pareti durante lo scavo. Per evitarlo c'erano tre sistemi:

a) dare una certa inclinazione al taglio laterale (pareti a scarpa; fig. 5.2 dis. 2);

b) profilarlo a gradoni (fig. 5.2 dis. 3);

c) realizzarlo in verticale e armarlo con sbadacciature (fig. 5.2 dis. 4).

Per le fondazioni in calcestruzzo il procedimento più adatto era l'ultimo mentre gli altri due potevano essere adoperati, soprattutto il primo, quando si usavano blocchi di pietra.

La sbadacciatura (o sbadacchiatura) che, è bene ripeterlo, era fatta per impedire che franassero le pareti di terra e non per contenere la muratura, consisteva in due pareti contrapposte fatte con tavolato orizzontale contro terra e travi verticali all'interno. A distanziarle si mettevano puntoni a contrasto tra i ritti (fig. 5.2 dis. 5) che per la loro posizione e funzione erano i soli a poter essere recuperati (e quasi sempre lo erano) a mano a mano che si collocava il calcestruzzo. Nei casi in cui non vennero asportati troviamo nel conglomerato i fori passatori tra due ritti contrapposti.

Più raramente, e sembra solo in rapporto a fondazioni di scarso sviluppo lineare (cfr. il cosiddetto Arco di Tiberio, al Foro Romano), la tessitura del legname era ruotata di 90 gradi, con le assi collocate verticalmente e le travi in orizzontale. Per le sbadacciature nello scavo dei pozzi (Favent., 4): «*tabulas axium directas faciendo submittes et eas vectibus ligneis transversis distinebis, ne labens terra ruina ponderis periculum faciat*».

Qualche volta, se lo scavo raggiungeva la falda d'acqua, occorreva la doppia sbadacciatura con intercapedine impermeabilizzato (qualcosa di simile alle fondazioni per i ponti; cfr. par. 5.3). Questo sistema si è trovato applicato in età dioclezianea nelle colonne onorarie a ridosso del *Lacus Curtius* al Foro Romano (Giuliani, Verduchi, 1987, pp. 166 s).

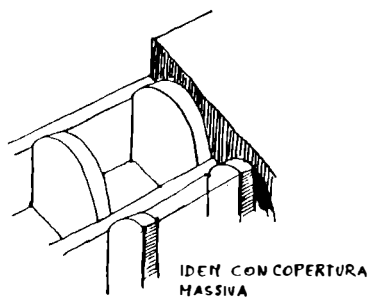
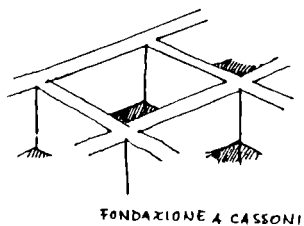
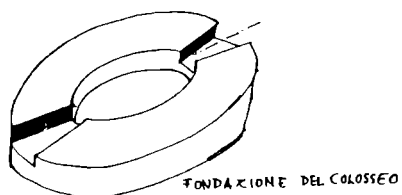
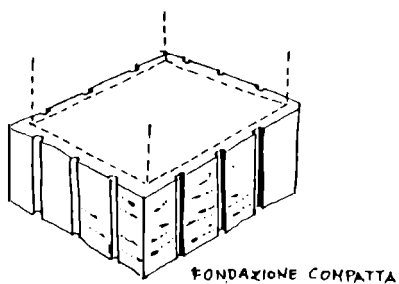
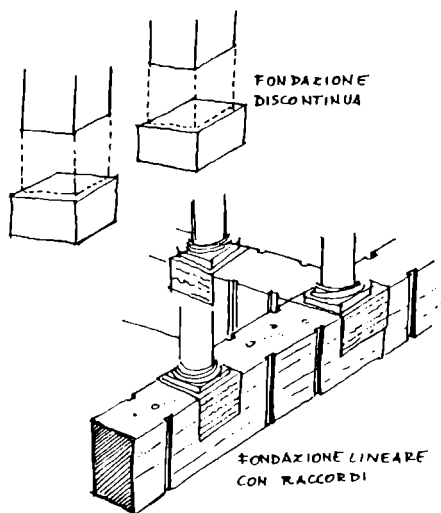
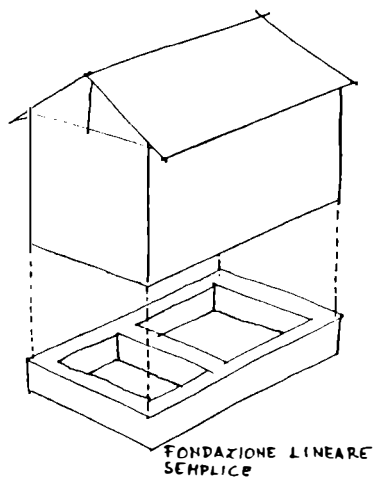
5.3. Classificazione delle fondazioni

Esse si distinguono in varie categorie seguendo parametri diversi:

1. In base alla profondità:

a) *fondazioni immediate*: quando si appoggiano su piani consistenti posti a relativa profondità (meno di 4 m);

b) *fondazioni profonde*: quando penetrano molto nel terreno, comunque più di 4 m.

FIGURA 5.3
Fondazioni in base alla planimetria

2. In base alla planimetria (fig. 5.3):

a) *fondazioni discontinue*: quando sono limitate a singoli piloni allineati (acquedotti, ponti ecc.);

b) *fondazioni lineari semplici*: quando ripropongono esattamente lo schema planimetrico dell'edificio;

c) *fondazioni lineari con raccordi*: se mostrano legamenti al piano fondale senza corrispondenza nell'alzato, come nelle fondazioni dei colonnati dei templi;

d) *fondazioni a piattaforma omogenea*: quando si ha un nucleo compatto di calcestruzzo senza vuoti all'interno, come sembra sia stato riconosciuto per il Colosseo;

e) *fondazioni a telaio*: quando il terreno cattivo imponeva la realizzazione di cassoni di calcestruzzo aperti in alto e riempiti di materiale di riporto, come in alcuni esempi di età imperiale sul Palatino;

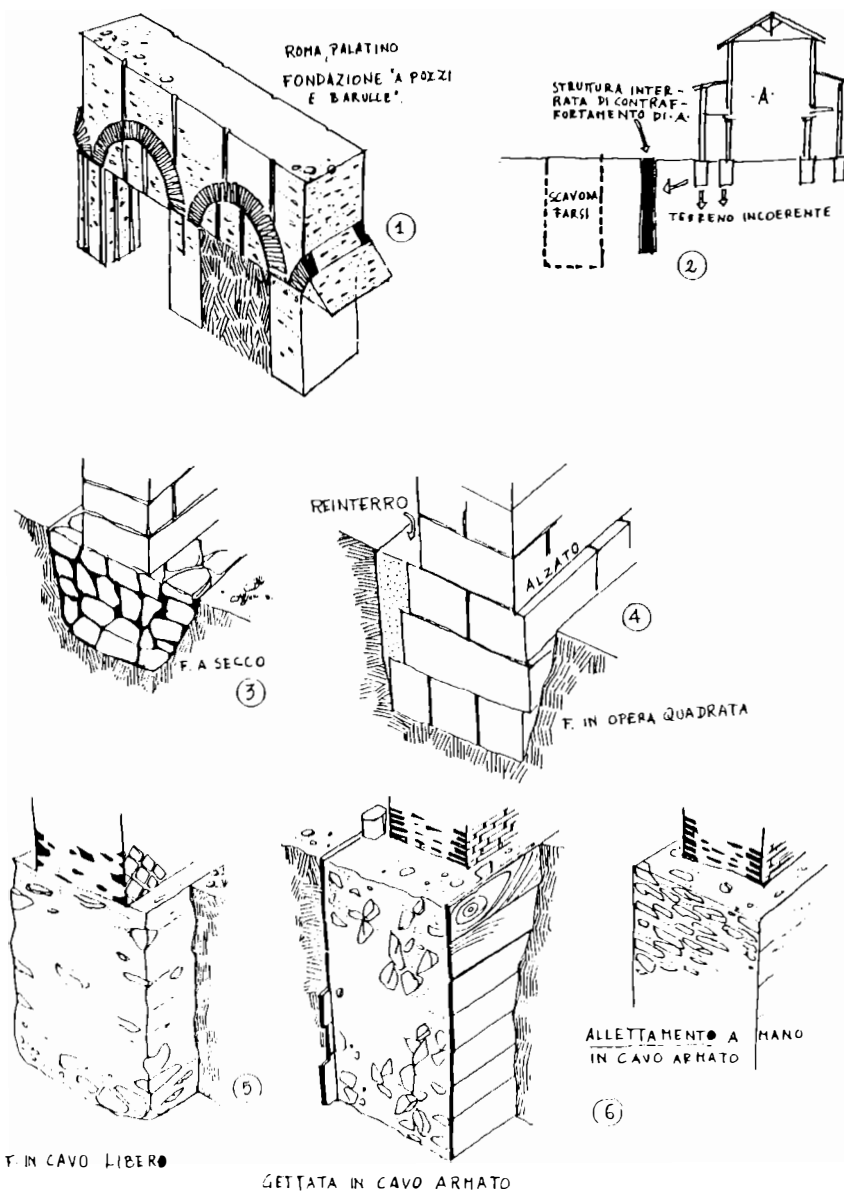
f) *fondazioni a telaio con copertura massiva*: è il tipo precedente provvisto di raccordi di archi o volte in serie. È un sistema che si incontra già in età repubblicana e non sempre riesce a distinguersi dalle sostruzioni cave se non per la collocazione. Esempi se ne trovano a Roma nella zona più interna del *Tabularium* (dove le pareti verticali furono gettate in casseforme e i vuoti interrati col procedere della costruzione) e nel cortile della colonna nel Foro di Traiano;

g) *fondazioni a "pozzi e barulle"*: quando si scavavano pozzi profondi a intervalli regolari e si riempivano di muratura. Poi, a una certa quota, i plinti così ottenuti venivano raccordati da archi di scarico affogati in una struttura continua di calcestruzzo (fig. 5.4 dis. 1).

3. In base alla struttura:

a) *fondazioni a secco di pietrame irregolare* (fig. 5.4 dis. 2): sono quelle fatte con materiale di scarto, per lo più schegge di lavorazione mescolate a terra, il tutto alloggiato in un solco di modesta profondità, spesso anche con contorni irregolari, e battuto con mazzeranga per costiparlo. Sono tipiche degli edifici di scarsissimo impegno statico o dei muretti di recinzione. In qualche caso collocabile nella media età repubblicana il tipo si evolve, si adoperano schegge di una certa consistenza ben connesse tra loro e allettate in terra con grumi di malta di calce molto magra. Qui il lavoro è più accurato, il piano di spiccato risulta ben livellato tanto da potervi impostare dei blocchi squadrati e gli stessi limiti di trincea sono tirati a filo;

b) *fondazioni a secco di blocchi squadrati*: tipo molto usato, prima della diffusione del calcestruzzo soprattutto per edifici staticamente impegnativi come templi, basiliche ecc. La trincea doveva essere leggermente più ampia della fondazione stessa (e in genere con pareti a scarpa); di frequente avevano il piano di spiccato più stretto di quello di appoggio e assumevano così un profilo di sezione a trapezio particolarmente adatto a distribuire il carico sul terreno (fig. 5.4 dis. 4). A queste opere venivano destinati i blocchi di cava che dopo la stagionatura risultavano difettosi (Vitr., 2, 7, 5). Qualche volta sulla verticale dei carichi concentrati, come, per esempio, le colonne, si metteva in opera un mate-

FIGURA 5.4
Fondazioni in base alla struttura

riale più resistente alla compressione che non nel resto della fondazione. Così in un organismo di calcestruzzo o di blocchi di tufo è facile trovare il posto delle colonne segnato da nuclei di travertino (fig. 5.3), pietra di monte ecc.;

c) *fondazioni in calcestruzzo* (fig. 5.3 diss. 5, 6): dato lo stato semifluido del materiale che le formava riempivano completamente il cavo di fondazione (tanto quello libero quanto quello armato) escludendo così la sopravvivenza stratigrafica di qualunque residuo della trincea, come invece avveniva, talvolta in modo chiarissimo, quando si mettevano in opera i blocchi. È interessante il racconto dell'Uggeri (1802, p. 21) a proposito delle fondazioni di Palazzo Braschi a Roma. Egli, che le vide gettare, dice:

> determinata la fossa, che doveva contenere questi grandissimi muri o fondamenti, vi si introdusse un piede d'acqua in circa, in cui si versava dai muratori promiscuamente da ogni lato della fossa massi di tufo e schifi [cofane] di liquido cemento [malta] il quale reso anche più liquido e permeabile dall'acqua penetrava ogni vacuo, riempiva ogni spazio abbracciando in tal modo la scabrezza e porosità dei tufi, spariva l'umido, l'acqua dava luogo al cemento che s'induriva, e unito coi tufi formava un sol masso della capacità e forma della fossa istessa.

4. In base al modo di costruzione:

a) *fondazioni con cortina a faccia vista* (fig. 5.5): si ebbero in ogni epoca quando, per vincoli imposti dalla pendenza del terreno, un tratto delle fondazioni durante la costruzione si trovava fuori terra. In questo caso si costruiva come se si trattasse di un muro d'alzato provvedendo comunque alla risega di fondazione. A lavoro ultimato dipendeva dalla sistemazione generale del piano di calpestio circostante, se essa veniva interrata oppure rimaneva in vista. In qualche caso, per evidenti errori di quotatura – molto più frequenti di quanto si pensi – se restava fuori terra veniva scalpellata e portata al filo dello spessore del muro di alzato per regolarizzare la parete;

b) *fondazioni in cavo libero* (fig. 5.4 dis. 5): erano quelle in cui il calcestruzzo si immetteva nella trincea priva di armatura, quando il terreno era sufficientemente affidabile e lo scavo poco profondo. La muratura allora si stampava sulle pareti della fossa aderendovi e conservandone la forma che risultava abbastanza irregolare e con il profilo inferiore concoide;

c) *fondazioni in cavo armato* (figg. 5.4 dis. 6; 5.5): fu il sistema più diffuso soprattutto per le fondazioni profonde. Il calcestruzzo conserva, talvolta con grande dettaglio, le impronte dell'armatura. Nella maggior parte dei casi e soprattutto per i grandi edifici, il pietrame era allettato a mano per strati successivi affogati in malta molto ricca d'acqua, e battuti in modo da eliminare ogni sacca d'aria. Per fondazioni molto estese impossibili da realizzare di getto, si costruivano piccoli muri (dello spessore di circa 1 piede) per delimitare i successivi tratti; il sistema è visibile nelle fondazioni del peristilio del Tempio di Venere e Roma (fig. 5.5);

d) *fondazione mista di conglomerato con o senza cortina* (fig. 5.5):

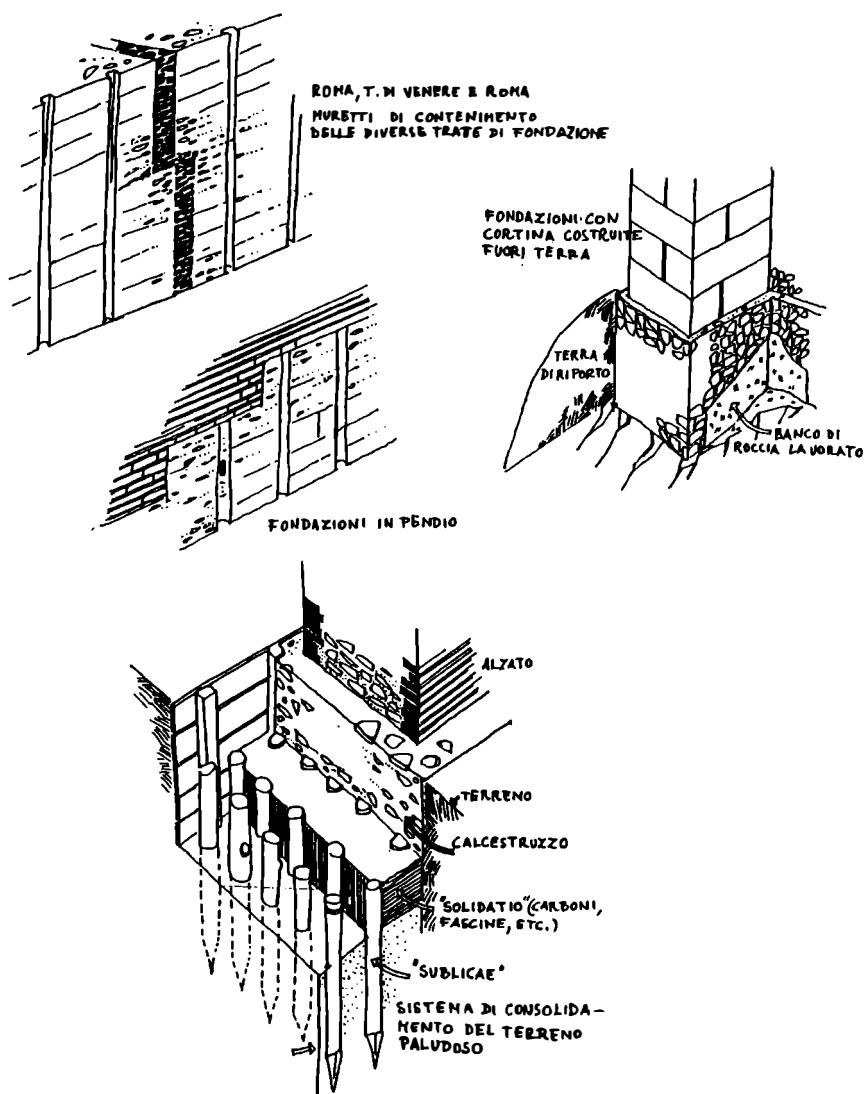
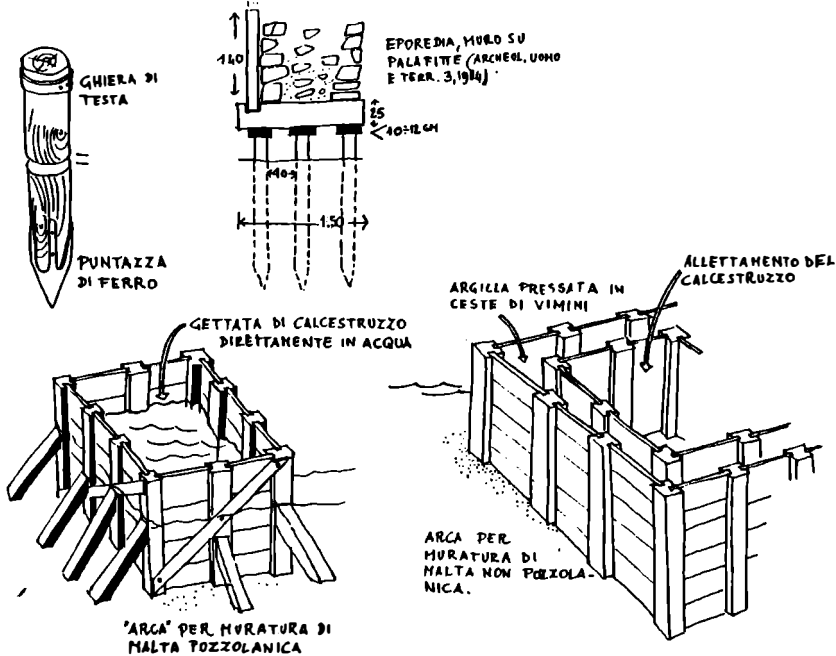
FIGURA 5.5
Altri tipi di fondazioni

quasi sempre il piano di cantiere differiva da quello definitivo del pavimento e abbastanza spesso quello di spiccato della costruzione era diverso dall'uno e dall'altro. Poteva infatti essere più alto o, caso più frequente, più basso. Si aveva allora una situazione per cui la parte inferiore

FIGURA 5.6
Fondazioni su palafitta e subacquee

delle fondazioni era fatta in calcestruzzo in cavo armato fino alla quota di interro del momento, e la parte superiore costruita con le cortine come se fosse una faccia vista. Questo succedeva soprattutto quando l'edificio comportava un cambiamento generale di livello rispetto alla situazione preesistente. Allora, a mano a mano che si innalzava la fondazione con la cortina (qualche rara volta non c'era cortina ma armatura di tavole priva dei solchi delle travi perché poste all'esterno del tavolato) si procedeva a reinterrare la zona (esempi: muro di perimetro delle terme di Caracalla, muri dell'*Atrium Vestae* all'altezza della cosiddetta Domus Publica, gran parte delle strutture ostiensi connesse con i reinnalzamenti a partire dall'età di Domiziano);

e) *fondazioni su palafitta* (figg. 5.5 e 5.6): sono quelle in zone paludose (o direttamente in acqua) che, per la pessima qualità del terreno, avevano bisogno di un preventivo consolidamento del piano fondale. Vitruvio (3, 4, 2) dice che dopo aver fatto la trincea

> si debbono piantare pali di ontano o di olivo o di quercia induriti al fuoco e spingerli giù, fitti, col maglio. Lo spazio tra le parti dei pali che restano fuori del terreno vanno colmate con carboni e solo dopo si riempiranno le fondazioni con muratura solidissima.

È probabile che almeno in qualche caso le teste delle travi, per evitare che si sfibrassero ai colpi del battibalo, fossero guarnite di ghiera metallica così come l'altra estremità era provvista di puntazza di ferro per facilitarne la penetrazione nel terreno. I pali erano infissi per mezzo di un battipalo (o mazza a castello): nella cantieristica ottocentesca si consideravano ben messi quando a seguito di una "volata" (= 10 colpi di battibalo) non penetravano ulteriormente. Data l'empiricità del sistema, in antico non doveva avvenire diversamente. Le teste dei pali venivano poi pareggiate (ma non a pelo del terreno) e gli intervalli riempiti appunto di carbone o fascine compresse; per quest'uso cfr. anche Plinio (*N.H.*, 36, 95); egli parla dell'*Artemision* di Efeso, in cui su uno strato di carbone compresso ne fu steso uno di fiocchi di lana di pecora. Dopo di che il tutto fu ricoperto da una fondazione solida e compatta per evitare squilibri di carico sui pali. Esempi di queste palafitte sono stati trovati in più occasioni soprattutto nell'area padana (Vitr., 2, 9, 11, cita Ravenna come la città in cui si costruivano così tutti gli edifici, sia pubblici sia privati);

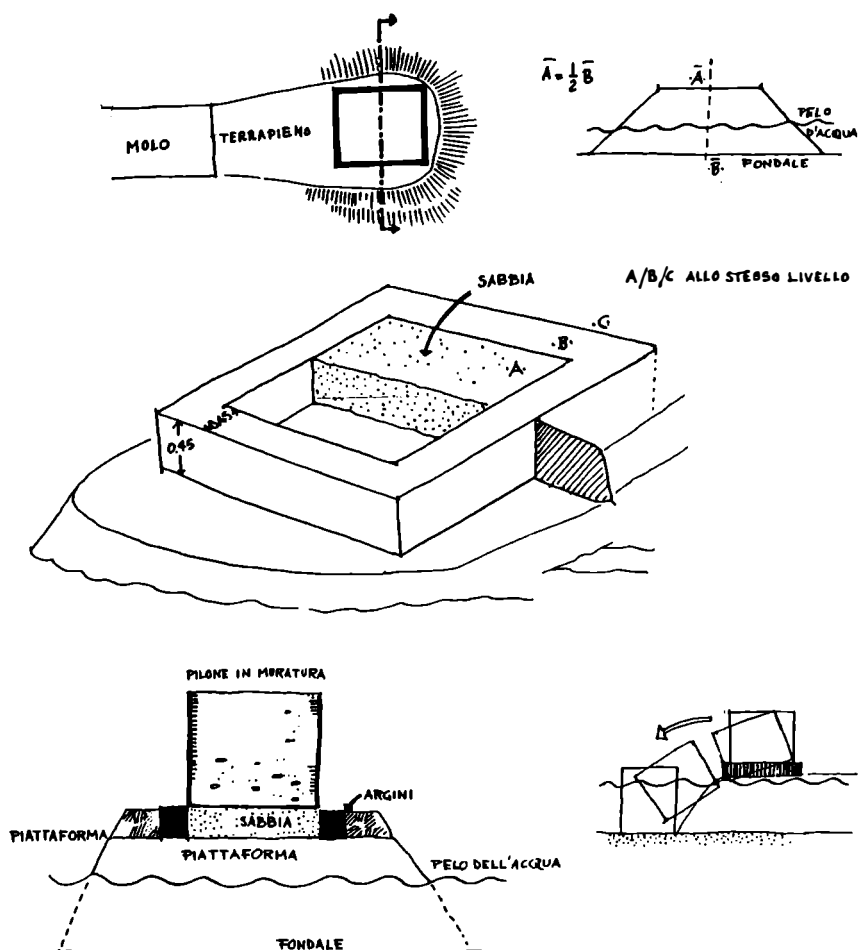
f) *fondazioni subacquee* (fig. 5.6): dovendo gettare fondazioni direttamente in acqua era necessario prima di tutto realizzare un dispositivo capace di impedire il dilavamento della malta nei primissimi giorni. Naturalmente bisognava distinguere tra i diversi tipi di malta a disposizione. Infatti i procedimenti differivano se si disponeva di malta idraulica, e quindi pozzolanica, oppure no. A seconda delle circostanze variava infatti l'armatura che rendeva possibili le fondazioni. Vitruvio (5, 12, 2-3) descrivendo quelle da farsi in mare (ma il procedimento era lo stesso anche per le acque dolci) si assicura innanzitutto la disponibilità della pozzolana da mescolare con la calce nel rapporto di 2 parti con 1 di calce. È da notare che egli parla esclusivamente della pozzolana dei Campi Flegrei e dell'area immediatamente circostante; spiega infatti che bisogna trasportarla dalla zona compresa tra Cuma e Sorrento. Noi sappiamo però che la pozzolana dell'area laziale ha qualità analoghe se non superiori a quella campana e allora bisogna dedurre o che le cave laziali non erano ancora coltivate, cosa che appare strana, oppure che la citazione esclusiva della pozzolana campana è il riflesso di una situazione particolare che affidava a maestranze, e forse a progettisti specializzati di quella regione, la realizzazione di opere portuali, piscine a mare, fari ecc. Questa, che per il momento è solo un'ipotesi di lavoro, è però suffragata dall'impiego di tecniche costruttive particolari per queste opere, come l'uso frequentissimo dell'opera a blocchetti in contesti di tecniche edilizie differenti e in periodi non canonici. Si potrebbe pertanto pensare che le maestranze, per l'esecuzione di lavori così specialistici, si servissero solo di quei materiali che avevano lungamente sperimentato. Il procedimento costruttivo era questo: stabilito il luogo della fondazione, si calavano in acqua dei cassoni (*arcae*) fatti con travi di quercia incatenate con traverse e si ancoravano saldamente sul fondale con saettoni. Poi, dopo aver ripulito e pareggiato il fondo con rastrelli, si gettava la muratura fino a riempire completamente la cassaforma. Così evidentemente si espelleva l'acqua; la malta idraulica assicurava comunque il tiro. Quan-

do non si disponeva di malta idraulica per la mancanza di pozzolana (o, aggiungiamo noi, della polvere di laterizio), Vitruvio (5, 12, 5) dice che era necessario, dopo aver costruito cassoni a doppie paratie legate insieme da assi e traverse, calarli in acqua nel luogo previsto.

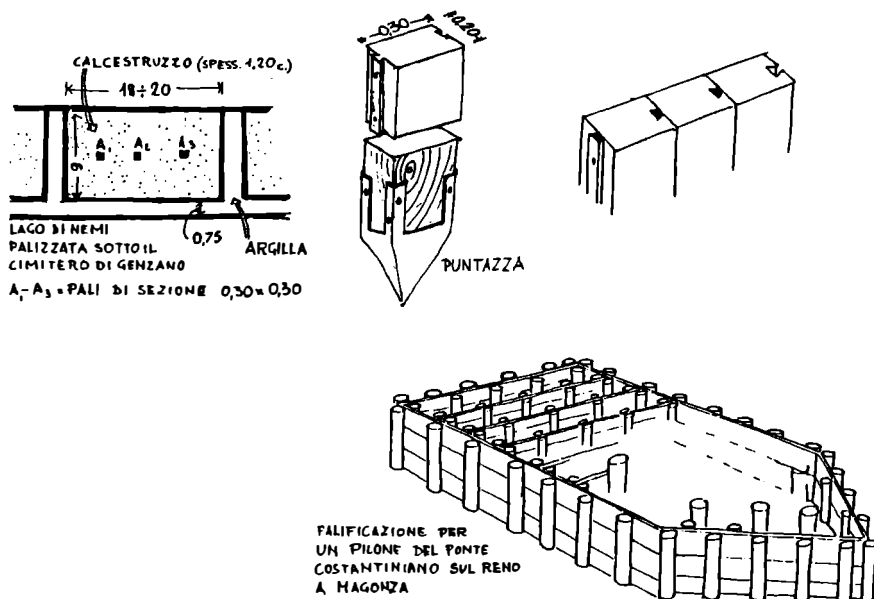
Nell'intercapedine veniva pressata argilla raccolta in ceste di vimini (fig. 5.6) ottenendo così una parete stagna. Costipata adeguatamente l'argilla, si svuotava lo spazio centrale dall'acqua, adoperando *coclee* (= vite di Archimede) e ruote acquarie, e si lasciava asciugare per quanto possibile. Poi si scavavano le fondazioni che, se erano in mare, dovevano essere parecchio più ampie della struttura che bisognava costruirvi sopra; infine si riempiva il tutto con calcestruzzo di calce e sabbia. È chiaro che nel caso della malta idraulica si aveva un calcestruzzo più affidabile per le caratteristiche chimico-fisiche, ma, avvenendo la gettata in acqua, si aveva per forza di cose una disposizione disordinata del pietrame e pertanto dalle qualità meccaniche non ottimali. L'inverso poteva verificarsi nel secondo caso, perché, lavorando all'asciutto dentro la cassaforma, gli operai potevano curare il giusto assetto del pietrame. Un processo completamente diverso si attuava quando, o a causa dei frangenti o per la violenza del mare aperto, non si riusciva ad ancorare adeguatamente i cassoni (Vitr., 5, 12, 4). Occorreva allora fare una piattaforma, la più salda possibile, partendo da una base ferma, la spiaggia o un molo preesistente. La piattaforma doveva avere la sezione rivolta a mare tale che il profilo di coronamento fosse inferiore alla metà di quello di base (fig. 5.7). Raggiunto con la piattaforma il punto dove si doveva costruire la fondazione, si alzavano tanto verso l'acqua (tre lati) quanto verso la terraferma, muretti alti m 0,45 sul piano della piattaforma. Il vuoto interno si riempiva di sabbia e si livellava col resto della struttura. Sulla verticale della sabbia si costruiva poi un pilone in calcestruzzo delle dimensioni necessarie e lo si lasciava tirare per almeno due mesi. Fatto questo si demolivano i margini: la sabbia non più trattenuta veniva asportata dalle onde e il pilone scivolava in mare nel posto stabilito. Con questo sistema si poteva avanzare in acqua qualunque struttura quando era necessario. Il Leger (1875, p. 105) ci testimonia che nel 1760 gli ingegneri italiani provarono a riprodurre blocchi artificiali in calcestruzzo per restaurare il porto di Civitavecchia, ma siccome usarono pietrame di pomice per ottenere massi più leggeri e manovrabili essi furono presto dissolti dal mare. Così pure accadde in altri tentativi, ma per la cattiva qualità della malta. Solo nel pieno Ottocento si riuscì a risolvere il problema della confezione dei blocchi di conglomerato.

Un altro sistema, forse ancora più diffuso e adatto a grandi profondità, è quello descritto, al tempo di Traiano da Plinio il Giovane (*Ad Famil.*, 6, 31) per il porto di Centumcellae (Civitavecchia) che egli vedeva realizzare:

Il lato sinistro del porto è già terminato mentre il destro è in costruzione. All'ingresso del porto si sta erigendo una piccola isola frangiflutti per un più sicuro transito delle navi.

FIGURA 5.7
Gettate per moli

Vale la pena di vedere come quest'isola viene fabbricata: una larghissima chiatta vi trasporta grandi massi di pietra che, accatastati gli uni sugli altri restano saldi grazie al loro peso e fanno emergere una specie di diga che con il tempo sembrerà un'isola vera e propria.

Il metodo è descritto dal Leger (1875, p. 106) per alcuni antichi ponti della Gallia romana: è il sistema a "pietre perse", cioè si gettavano

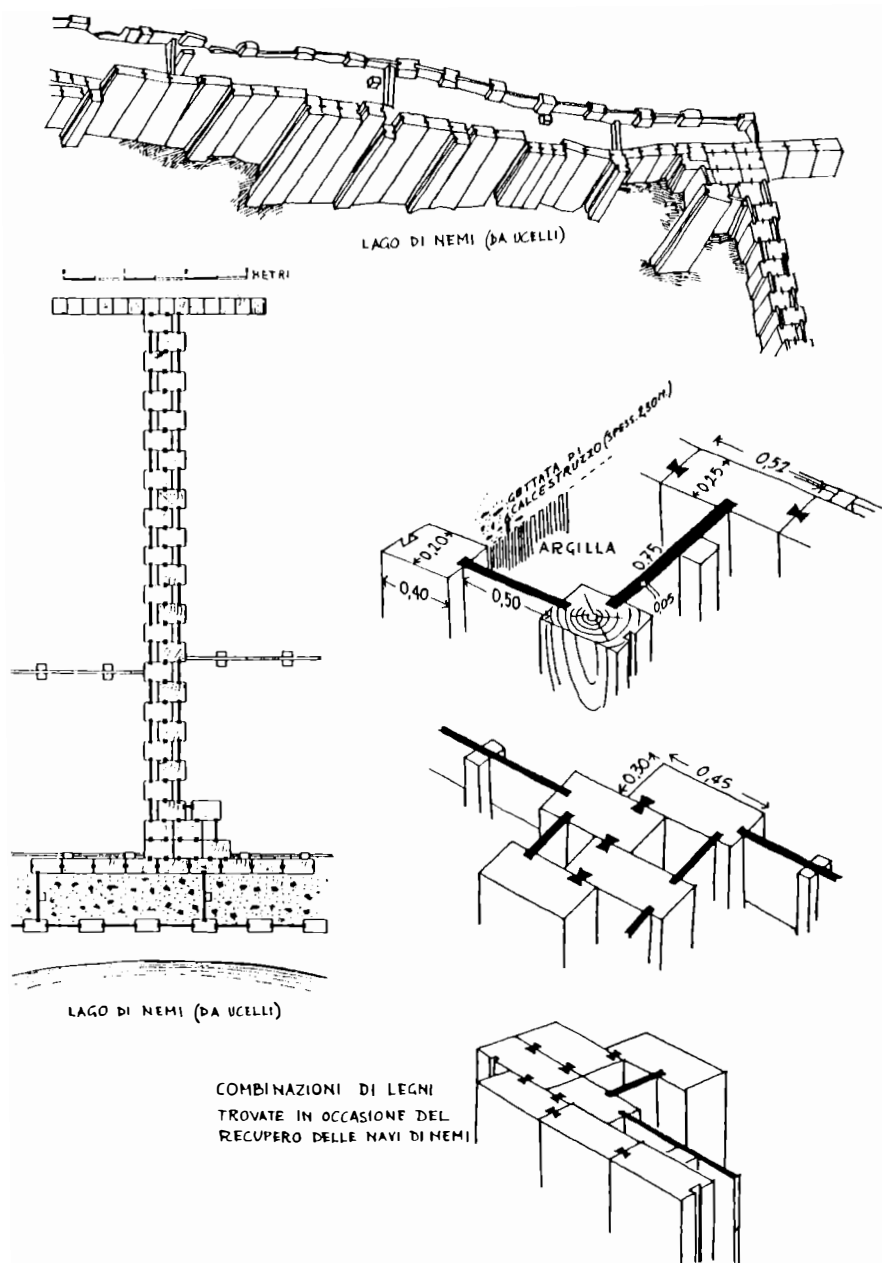
FIGURA 5.8
Tecnica delle casseforme

pietre fino a 6/4 m dal pelo dell'acqua «poi su queste piattaforme si calavano cassoni ripieni di muratura che però erano in stabilità precaria a causa della irregolarità della superficie dei cumuli di pietre». Un espediente particolare, del tutto occasionale ma dello stesso genere, si desume dalla sorte della grande nave usata da Caligola per il trasporto dell'obelisco per il Circo Vaticano. Il natante era tanto grande da non poter essere adoperato per altri trasporti e allora Claudio lo fece affondare riempiendolo di calcestruzzo e lo usò come base per i piloni del faro di Ostia (Suet., *Claud.*, 20, 3), o come vuole Plinio (*N.H.*, 16, 40) per il molo sinistro del porto.

La tecnica delle cassaforme del testo vitruviano trova consistenti riscontri in diversi rinvenimenti di strutture lignee in ambiente lacustre e fluviale.

Per tutti ricordiamo le estese e complesse opere di consolidamento delle rive, probabilmente in relazione anche con una via circumlacuale, affiorate durante i lavori per l'abbassamento del livello del lago di Nemi per il recupero delle navi (Ucelli, 1950, pp. 119 ss.).

I legnami adoperati furono in prevalenza l'*abies pectinata* e la *quercus cerris* lavorati in travi di m 3/3,70 di lunghezza e una sezione variante tra m 0,30 × 0,20 e m 0,25 × 0,52.

La disposizione delle travi era su due file parallele distanti tra loro m 0,75 (piedi 2,5); da esse ogni 18/20 m si staccavano altre due file con

FIGURA 5.9
Consolidamento della riva del lago di Nemi

andamento ortogonale che si collegavano a una fila singola posta 9 m a monte delle altre. In questo modo si ebbero cassoni di m 18/20 × 9 che vennero riempiti di calcestruzzo per uno spessore di circa m 1,20. Sulla linea mediana, a intervalli regolari c'erano incassati nel conglomerato 3 pali a sezione quadrata di m 0,30 di lato (fig. 5.8). L'intercapedine tra la doppia fila di assi fu trovato pieno di argilla costipata. I pali erano appuntiti e qualcuno era provvisto di puntazza di ferro a quattro alette; il collegamento era ottenuto con incastri a farfalla con il maschio riportato e inchiodato.

Oltre a questa struttura affiorata sotto il cimitero di Genzano, si trovò quella, in località "Licino", di concezione più complessa. Era fatta di pali a sezione 0,40 × 0,20 posti alla distanza di circa m 0,50 e collegati da tavoloni di quercia spessi 5 cm come illustrato nella figura 5.9. Il tutto sorreggeva una gettata di conglomerato spessa m 2,50. Nella struttura furono impiegati anche travi a sezione 0,25 × 0,52 m.

5.4. Strutture di contraffortamento interrate

Non è detto che ogni struttura fatta per essere interrata, e quindi con i sistemi propri delle fondazioni, debba per questo essere letta necessariamente come fondazione. Certe volte, dovendo procedere a sbancamenti o scavi ampi e profondi in prossimità di grosse costruzioni bisognava realizzare, a seconda delle specie di terreno, delle vere e proprie sostruzioni interrate capaci di reggere la spinta delle terre e delle costruzioni preesistenti (è un po' il caso delle moderne palificazioni in calcestruzzo armato per sostenere le sollecitazioni laterali durante grandi sterri). Non è poi detto che a lavori finiti questa struttura, che nel dettaglio non si distingue da una normale fondazione, abbia sostenuto un alzato: poteva infatti restare sotto il piano di calpestio e continuare la sua funzione di imbrigliamento del terreno (fig. 5.4 dis. 2).

In sostanza non possiamo escludere che una "fondazione" senza traccia di alzato e priva di un andamento planimetrico chiarificatore, sia un'opera di contenimento. In questo caso si potranno ricavare indicazioni piuttosto dall'intorno edilizio; così è per le pseudo *anterides* del Palatino (cfr. par. 4.3) e con ogni probabilità anche per la lunga struttura curvilinea trovata tra la Basilica Emilia e il Foro di Nerva. Essa, che nella forma sottolinea il lato breve del Foro, può essersi resa necessaria per sostenere la spinta della Basilica (fondata per altro in terreno pessimo) durante lo scavo per le fondazioni del grande muro di fondo del Foro di Nerva.

6

Alcune opere accessorie

6.1. Pavimentazioni

Lo spessore dei pavimenti antichi, almeno nelle costruzioni di un certo impegno, fu sempre ragguardevole.

Per i piani terreni Vitruvio (7, 4, 4) fa l'esempio del sistema usato dai greci per i triclini invernali, apprezzato per la funzionalità e l'economicità.

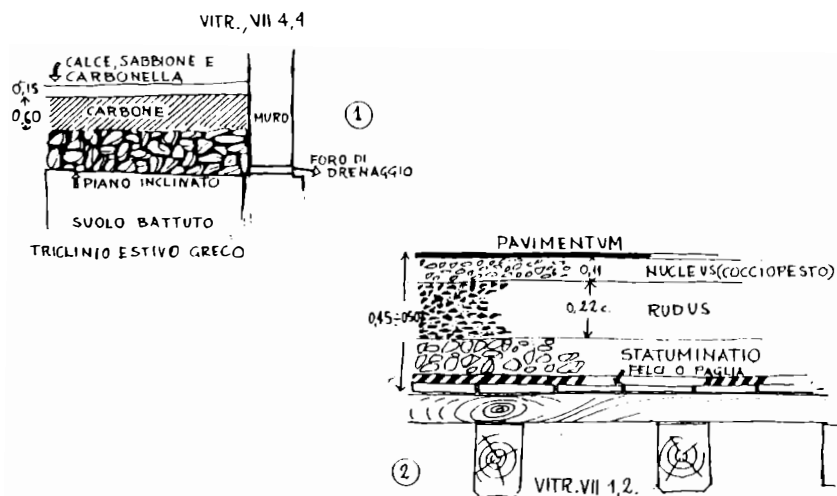
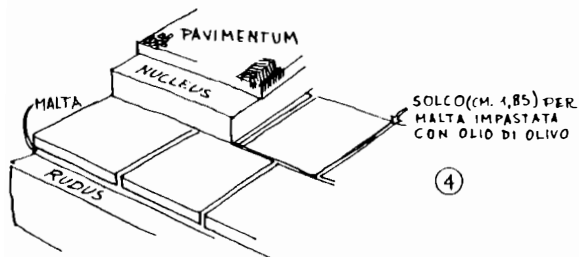
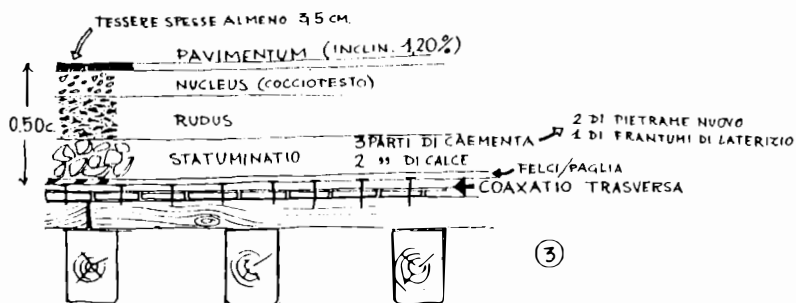
Lo spessore complessivo era di due piedi (m 0,60): a partire dal basso, sul suolo battuto, si disponeva un primo strato inclinato di pietrisco o di cocciame. In corrispondenza del livello inferiore si praticavano fori comunicanti con l'esterno (si trattava quindi di un vero e proprio vespaio per isolamento dall'umidità).

Al di sopra si stendeva uno strato di carboni ben costipati e poi ancora un masso, spesso mezzo piede, di conglomerato formato di calce e sabbione misto a carbonella e ben livellato (fig. 6.1 dis. 1). Con la politura il pavimento assumeva un colore nerastro e aveva le qualità di assorbire rapidamente i liquidi, e di consentire ai servi di camminare anche scalzi senza provare freddo.

Interessante è anche la descrizione del pavimento su solaio (7, 1, 2): dopo aver fatto il tavolato superiore bisognava proteggerlo con uno strato di felci o paglia dai danni che avrebbe potuto arrecare la calce del masso (*statuminatio*) steso al di sopra. Esso era fatto di malta mista a pietrame grande da entrare in un pugno. Sopra si poneva un battuto (*rudus*) di calce e pietrisco di pezzatura minuta facendo attenzione che se il *rudus* era di primo impianto le proporzioni in volume dovevano essere 1 di malta e 3 di pietrisco, mentre se si trattava di un rifacimento o di un restauro la proporzione diventava di 2 a 5. Questo strato andava rassodato e compattato a colpi di mazzeranga fino a ottenere uno spessore di 9 once o 3/4 di piede (cm 21,6/22,2).

Su tutto si disponeva un ulteriore strato composto di 1 parte di calce e 3 di frantumi di laterizio (= cocciopesto), spesso almeno 6 dita (cm 11,1) a formare il *nucleus* che serviva da supporto al pavimento vero e proprio che, fatto di tasselli o cubetti, andava tirato a squadra e livella.

Facendo la somma degli spessori dichiarati e di quello taciuto, ma ricostruibile con buona approssimazione (*statuminatio*), si raggiunge uno spessore che supera i m 0,45 così suddiviso:

FIGURA 6.1
Pavimentazioni

— *statuminatio* = m 0,10/0,15;
— *rudus* = m 0,222
— *nucleus* = m 0,111
— *pavimentum* = m 0,03 (cfr. fig. 6.1 dis. 2).

Una particolare cura, come del resto è ovvio, andava posta nella pavimentazione delle terrazze su solaio (7, 1, 5-6) perché le armature di legno aumentando di volume per l'umidità e contraendosi per l'aridità o abbassandosi per la flessione, col muoversi danneggiavano il pavimento che non riusciva a resistere più ai danni del gelo e della brina.

Così, per ridurre al minimo gli inconvenienti, dopo aver fatto un primo tavolato occorreva farne un altro tessuto ortogonalmente (*coaxatio transversa*) inchiodandoli insieme in modo da avere una doppia fodera alla grossa orditura. Poi si disponeva un conglomerato di 3 parti in volume di *caementa* (nel rapporto di 2 parti di pietrisco nuovo e 1 di frammenti di laterizio pestato) e 2 di calce. Questa dosatura garantiva una *statuminatio* efficiente a cui andava sovrapposto il cocciopesto secondo le modalità già dette. Infine si stendeva il pavimento di tessere spesse circa 2 dita (cm 3,6) facendo in modo che esso avesse una pendenza per lo smaltimento dell'acqua meteorica pari a 2 dita su 10 piedi (= m 0,036 su 2,96, pari all'1,21%). Anche qui dunque si raggiungeva uno spessore prossimo ai m 0,50. Questo pavimento restava al sicuro da guasti purché fosse fatto a regola d'arte.

Tuttavia in casi particolari si doveva stendere al di sopra del *rudus* un allettamento di bipedali su malta. Lungo il perimetro dei laterizi si lasciava un solco di 1 dito (cm 1,85) dove si colava malta di calce impastata con olio di olivo che andava poi compressa e sfregata. Una volta indurita, questa sostanza non era più soggetta ai danni dell'acqua, e i giunti restavano al sicuro da qualunque altra infiltrazione. Poi riprendeva lo stesso procedimento descritto prima: si stendeva il *nucleus* e il pavimento di mosaico od opera spicata con le necessarie pendenze (fig. 6.1 dis. 4).

Dal testo risulta la preoccupazione di realizzare una struttura il più rigida possibile, agendo sul doppio tavolato e ricorrendo a particolari accorgimenti nell'uso dei materiali, per evitare infiltrazioni che avrebbero accentuato il processo deformativo del legname. Lo spessore, davvero considerevole, da stupire se confrontato con le pavimentazioni analoghe di altre epoche, aveva bisogno di travature particolarmente robuste e ravvicinate, ma d'altra parte si tentava così, e ci si riusciva, di ottenere una lastra di muratura che fosse il più compatta e rigida possibile.

Non è neppure da escludere che nel calcolo si facesse un certo affidamento alla resistenza a trazione dell'insieme murario (per questo problema, cfr. par. 7.5.3).

Pavimentazioni di terrazze rispondenti a queste caratteristiche non si rinvengono facilmente e c'è da credere che i precetti non fossere applicati sempre alla lettera dato l'alto costo che comportava la loro realizzazione. Tuttavia vi sono esempi che, anche se di epoca più tarda, confermano in pieno il testo vitruviano. Basterà ricordare il solaio dell'*Augusteum* di Ercolano o le terrazze delle fabbriche tra il cosiddetto Stadio e la co-

siddetta sala con triplice esedra di Villa Adriana, dove sono conservati a terra numerosi e consistenti frammenti di questo tipo di struttura. La sola differenza è nel fatto che al posto dell'assise di bipedali si trova, caso non raro, uno strato strutturale di opera spicata, che non va letto come un primitivo piano di calpestio poi ricoperto da un altro masso pavimentale. L'opera spicata era forse destinata a una migliore impermeabilizzazione se non addirittura a rendere più rigida l'intera struttura.

Uggeri (1802, p. 73) cita lo stesso uso in un pezzo di pavimento visto al portico del Pecile, e un altro, abbinato però all'*opus sectile,* trovato negli scavi di fine Settecento nelle Terme di Traiano. Nella stessa occasione si trovò un mosaico posto su uno strato di "sanpietrini" di selce disposti in parallelo. Purtroppo non è possibile dalle annotazioni dell'Uggeri stabilire né se si trattava di resti di pavimenti di terrazza abbattuti né se erano *in loco,* e in questo caso se erano due fasi pavimentali o una sola.

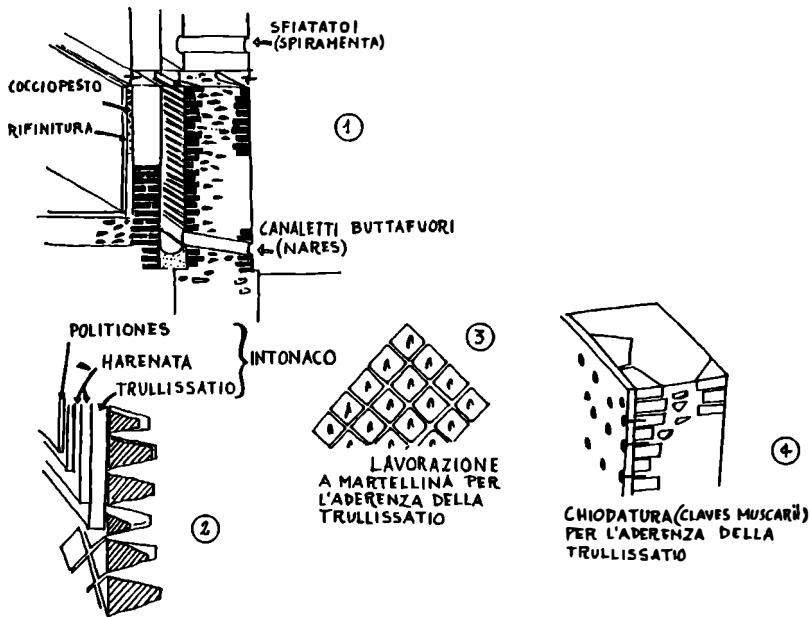
6.2. Impermeabilizzazione delle pareti

L'umidità è sempre stata uno dei principali nemici delle strutture edilizie, e i romani usavano accorgimenti differenti a seconda della gravità del caso. Se la parete di un piano terreno era soggetta a umidità di risalita, al momento di intonacare si dava una sgrossatura (*trullissatio*) di cocciopesto per un'altezza di circa 3 piedi dal pavimento in modo da fermare l'umidità e non danneggiare l'intonaco (Vitr., 7, 4, 1). Naturalmente l'altezza di questo zoccolo poteva essere maggiore e anche occupare l'intero spessore dell'intonacatura (cfr. cosiddetta Caserma dei Vigili di Ostia).

Se invece l'umidità aggrediva l'intero muro si costruiva una sottile parete distaccata per quanto possibile realizzando così un'intercapedine. Sul fondo, a quota più bassa del pavimento della stanza, si faceva un canale provvisto di buttafuori (*nares*) e in alto si aprivano gli sfiatatoi (*spiramenta*). La circolazione di aria impediva che l'umidità si comunicasse anche alla parete sottile. Per la rifinitura poi si procedeva con la sgrossatura di cocciopesto e l'intonaco consueto (fig. 6.2 dis. 1).

Quando non c'erano le condizioni per costruire la parete di fodera si faceva ugualmente il canale con gli sbocchi all'esterno al di sotto del piano pavimentale. Sui due margini si ponevano da una parte bipedali e dall'altra pilastrini di bessali distanti dalla parete non più di 1 palmo (cm 7,4) e posti in modo che su di essi potessero poggiare gli spigoli di bipedali messi in piano (quindi l'interasse dei pilastrini era intorno al m 0,60). Poi l'intera parete, dall'alto in basso, andava foderata con tegole provviste di uncini (*tegulae hamatae*) preventivamente impeciate nella faccia a muro per respingere l'umidità. Naturalmente anche in questo caso bisognava praticare i fori di sfiato in alto.

Restava un'ultima difficoltà: la sgrossatura di cocciopesto applicata direttamente sulle tegole tendeva a staccarsi, perché veniva disidratata

FIGURA 6.2
Impermeabilizzazione e rivestimenti parietali

con troppa rapidità. Per risolvere l'inconveniente era necessario scialbare la faccia esterna delle tegole con latte di calce (Vitr., 7, 4, 2-3).

6.3. Rivestimenti parietali

6.3.1. Intonaci

Per gli intonaci era necessario provvedersi dei migliori materiali (Vitr., 7, 2, 1 ss.): la calce più adatta doveva essere messa a macerare in vasca molto tempo prima dell'impiego in modo che, se vi fosse stato qualche nodulo poco cotto in fornace, si sarebbe comunque omogeneizzato con il resto attraverso la lunga macerazione. Del resto, ancora fino a qualche tempo fa, era uso, al momento di impiantare il cantiere, fare per prima cosa la fossa per macerare la calce destinata agli intonaci. Per sapere se la stagionatura era adeguata si impastava il grassello con la cazzuola (*ascia*) come se si stesse lavorando la malta. Se, estraendo il ferro, restavano attaccati dei noduli la calce non era ancora matura, se invece la lama veniva fuori pulita e asciutta c'era ancora bisogno di acqua, e, infine, se vi rimaneva attaccato una sorta di glutine allora era macerata al punto giusto.

Procurato il materiale adatto si cominciava a intonacare dall'alto. Vitruvio (7, 3, 3) fa il caso di un vano coperto con finta volta di graticcio di canne (cfr. par. 3.1.10): essa prima si regolarizzava con malta di calce e arena, e poi la si rifiniva con creta o malta di marmo. Alla linea d'imposta di facevano le cornici che dovevano essere sottili e leggere il più possibile per non correre il rischio che si staccassero per il peso. Nel farle si raccomandava l'uso esclusivo di polvere di marmo di grana uniforme, senza inclusioni di gesso per avere un tiro omogeneo nel tempo di tutta la cornice. Si disapprovava esplicitamente l'"uso antico", perché «gli aggetti in piano, di gran peso, delle cornici sospese alle volte sono molto pericolosi». Consigliava per una più agevole pulizia l'uso di modanature lisce nei vani destinati ad accogliere fuochi e candele.

Poi si passava alle pareti e si dava la sgrossatura (*trullissatio*), e mentre questa induriva si aggiungeva lo strato di malta di calce e arena (*harenatum*) tirato a regola d'arte con regolo e filo per le orizzontali, filo a piombo per le verticali e squadratura degli angoli. La sabbia da usare qui era quella di fiume (Vitr., 2, 4, 1 ss.).

A tiro avvenuto si applicava un terzo strato: la durata dell'intonaco dipendeva molto dallo spessore e dalla qualità di questi *harenata.*

Poi si passava alla rifinitura vera e propria (*politio*) fatta di calce e polvere di marmo granulosa impastata a parte e in modo tale che la cazzuola uscisse pulita dalla malta. Dopo che la prima *politio* aveva tirato se ne stendevano altre due con impasti sempre più raffinati (fig. 6.2 dis. 2). Così si evitava qualunque lesione all'intonaco. Vitruvio sembra inoltre riconoscere a esso anche una funzione consolidante della parete stessa (7, 3, 6).

Da ultimo, quando la rifinitura era ancora umida, andavano applicati i colori che restavano vivi e inalterabili nel tempo, e non poteva succedere che diventassero polverosi e solubili all'acqua come quando erano dati su supporti già asciutti.

Dal testo si desume la netta preferenza per un intonaco fatto senza alcun risparmio che però rarissimamente trova riscontro nelle strutture conservate, e si stabilisce anche uno stretto legame tra il suo spessore e la brillantezza finale. Esso si comportava, secondo il paragone dell'architetto, come uno specchio che, se ricavato da una lamina troppo sottile, non rifletteva adeguatamente.

Sembra che quello illustrato fosse il sistema seguito dei greci (7, 3, 10) – ma anche qui i riscontri sono assai scarsi – i quali per migliorare la qualità dell'*harenatum,* dopo averlo impastato nella vasca, lo battevano con mazzeranghe di legno per macerarlo meglio prima dell'uso. Così si aveva un intonaco, di qualità e resistenza tanto elevate, che era facile distaccare da vecchi intonaci quadretti dipinti per inserirli in decorazioni nuove. La inevitabile differenza di spessore provocava un leggero risalto lungo il contorno del riquadro che denunciava il fatto (7, 3, 10).

Accorgimenti diversi erano necessari negli intonaci delle tramezzature o anche nelle strutture fatte in *opus craticium* (cfr. par. 1.3) dove era facile la fessurazione in corrispondenza dei montanti e delle traverse per il diverso coefficiente di assorbimento dello scheletro ligneo rispetto alla

tamponatura. Per aggirare l'inconveniente si intonacava tutto col fango, poi si applicava uno strato di canne fissate con chiodi a testa larga (*clavis muscarius*) poi di nuovo fango e altre canne ruotate di 90 gradi rispetto alle prime. Si procedeva quindi con la normale intonacatura con malte di sabbia e di marmo; così si era sicuri di evitare le filature e le crepe del telaio ligneo.

L'intonaco antico però, accanto ai vantaggi, presentava l'inconveniente del peso eccessivo e quindi della precaria aderenza alla parete; si pensi che un mq di intonaco spesso 8 cm pesava circa 1 quintale (Cozzo, 1928, p. 185).

Per ovviare alla difficoltà si ricorreva a diversi espedienti; i più diffusi furono la *scalpellatura a martellina* e la *chiodatura*. Nel primo caso si davano dei colpi abbastanza radi (circa uno per tessera nell'opera reticolata) per rendere più scabra la parete (questo si trova anche nella superficie intradossale delle volte); nel secondo si fissava coi *claves muscarii* (chiodi a testa larga) lo strato di sgrossatura (*trullissatio*) al muro, e gli altri strati erano poi capaci di aderire perché applicati ancora a fresco (fig. 6.2 diss. 3, 4). Qualche volta si adottavano entrambi i sistemi; altre volte invece la coesistenza delle due tracce indica il rifacimento dell'intonaco.

Nelle pareti di laterizio, ma soprattutto sui rivestimenti di tegole (cfr. par. 6.2) l'aderenza alla terracotta doveva essere facilitata da una preventiva scialbatura con latte di calce (Vitr., 7, 4, 3) per evitare che il laterizio "bruciasse" l'intonaco.

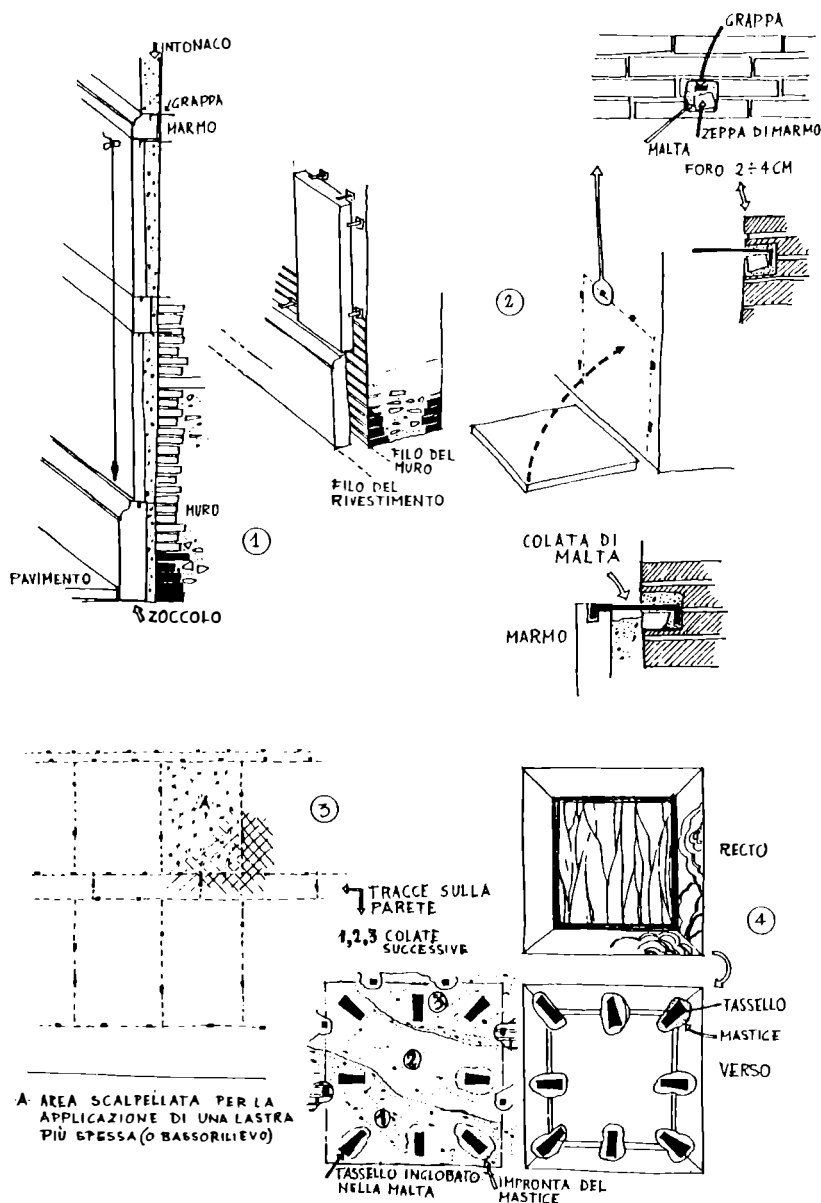
Si può pensare che questo sistema fosse adoperato in parallelo o in alternativa alla scalpellatura anche nei manti di intradosso delle volte. Il Cozzo (1928, pp. 181 ss.) pensa che questo rivestimento servisse proprio per favorire l'aderenza dell'intonaco, ma è smentito da Vitruvio che, come s'è visto, sostiene la caratteristica contraria del laterizio.

Un altro sistema sembra fosse quello delle piccole zeppe di cotto o di marmo fatte sporgere dal filo del muro. Il Cozzo (1928, p. 185) dice di averne riconosciuto l'applicazione nel cosiddetto Tempio di Minerva Medica.

Forse sono dovuti a una variante di questo sistema le migliaia di forellini (diam 5/6 mm) praticati a trapano nelle pareti della cella del Tempio di Giunone a Gabi. Probabilmente dovettero ospitare piccoli perni di legno. Questa caratteristica, a quanto mi risulta inedita, fu notata nel corso dei rilievi condotti da P. Verduchi e da me nel 1977: in quell'occasione pensammo che, data la durezza del peperino, si fosse rinunciato ai chiodi per i più semplici ed economici perni di legno.

6.3.2. Incrostazione marmorea

L'alternativa nobile all'intonaco fu l'incrostazione marmorea. Essa era usata soprattutto, ma non esclusivamente, negli interni, e si limitava in genere a un'altezza relativamente modesta oltre la quale, spesso con lo stacco di una cornicetta aggettante, cominciava l'intonaco vero e proprio (fig. 6.3 dis. 1).

FIGURA 6.3
Rivestimenti di marmo

Lo spessore delle lastre marmoree risultava irregolare a causa delle tecniche di segagione artigianali; questo sia da una lastra all'altra, sia nell'ambito della stessa tavola. L'irregolarità era dovuta anche al fatto che alcuni marmi potevano essere lavorati più sottili di altri con evidente vantaggio economico. Questo però impediva l'applicazione direttamente sulla parete rustica senza che tutte le irregolarità delle lastre restassero in vista. Quindi si doveva prima stabilire il filo esterno a una certa distanza dalla parete, e lasciare poi a questo spazio la funzione di assorbire le irregolarità. Si procedeva così: stabilito il filo esterno si presentava la lastra alla parete nella posizione che poi sarebbe diventata definitiva, si facevano dei segni di riferimento per applicare al muro le grappe lungo tre lati della lastra, i due verticali e quello orizzontale superiore (fig. 6.3 dis. 2).

Rimosso il marmo si praticavano con lo scalpello degli alloggiamenti quadrangolari di 2/4 cm di lato in cui si collocavano le grappe di bronzo fissandole con malta e piccole zeppe di marmo o laterizio (per le grappe si usava più raramente il ferro perché questo, ossidandosi, aumentava di volume col doppio inconveniente di macchiare il marmo e spaccarlo). Si ricollocava la lastra e si piegavano le grappe a uncino alloggiandole nelle sedi predisposte lungo i bordi di essa. In questo modo il marmo restava distanziato dalla parete, e nell'intercapedine si colava malta pozzolanica abbastanza liquida in modo da saldare l'intera superficie del marmo alla parete. In mancanza della pozzolana si adoperava un tritume molto fine di laterizio. Se capitava una lastra troppo spessa, o un bassorilievo – che di solito era ricavato su elementi di spessore considerevole – si ricavava lo spazio necessario scalpellando la parete (fig. 6.3 dis. 3).

Nella malta di sostegno si trovavano frequentemente tasselli di marmo di scarto, di ardesia, talvolta di terracotta che erano applicati con stucco o gesso sul retro della lastra (la stessa cosa si trova nei massi pavimentali) e che furono inglobati dalla colata di malta. Si tratta dei supporti posteriori per formare, partendo da più elementi, una tavola che, composta a parte, veniva montata come se fosse tutto un pezzo (fig. 6.3 dis. 4).

Dopo, asportato il marmo, restano evidenti le tracce di tutto questo lavoro: nel caso che si sia conservata la malta sul muro, essa mostra i tasselli e/o le loro impronte e spesso, in negativo, anche quelle delle sbordature del gesso che fissò i tasselli al retro della lastra e che, data la scarsa resistenza agli agenti atmosferici, è sempre scomparso. Riconoscibilissimi sono anche i fori da grappa la cui posizione ripropone quella originaria delle lastre singole o composte e, quando si verificò, anche la presenza di una doppia fase decorativa.

Queste osservazioni restano possibili, anzi in qualche caso addirittura facilitate, anche quando fosse completamente scomparsa la malta di allettamento. A patto, però, di non confondere i fori da grappa con le scoppature risultanti dall'asportazione dei chiodi a T per l'applicazione dei tubuli per il riscaldamento parietale, o di quelli per il fissaggio dell'intonaco (*claves muscarii*); (cfr. par. 6.3.1).

7

Richiami sui materiali da costruzione e sulle strutture murarie antiche (ambiente romano)

La scelta dei materiali e dei sistemi costruttivi ha sempre condizionato l'arte del costruire (cfr. Vitr., 2, 4, 3; 2, 6, 6). È quindi opportuno richiamare alcune caratteristiche degli uni e degli altri per orientarsi nello studio degli edifici antichi.

Nei manuali di ingegneria di inizio secolo la muratura era ancora definita (Baggi, 1926, p. 176):

> un aggregato di pietre distribuite più o meno regolarmente e più o meno perfettamente combacianti le une con le altre, le quali possono essere posate a secco, oppure cementate insieme da una malta, con la quale si spalmano le superficie di contatto fra pietra e pietra e si riempiono (con o senza sussidio di scaglie) i vani determinati dalle irregolarità di forma delle pietre stesse.
>
> Le pietre per le murature si distinguono in naturali (sabbie, ghiaie, pozzolane, pietrame) e artificiali (mattoni, calce viva, gesso).

Dunque vengono dette "pietre" anche quei materiali che per il loro stato di polveri non siamo abituati a considerare tali.

7.1. Materiali naturali

Il pietrame destinato al nucleo (*caementa*), come quello usato per le cortine, poteva essere grezzo o lavorato.

Quello grezzo a *pezzatura naturale* era il brecciame derivato dalla frantumazione delle rocce dovuta agli agenti atmosferici. Esso si raccoglieva in genere nei banchi alle pendici dei monti, e qualche volta sparso sui terreni collinari. Se il materiale era fluitato si avevano ciottoli genericamente ellissoidici con angoli smussati; in caso contrario risultavano forme poliedriche e spigoli vivi. Quando nel banco esistevano infiltrazioni terrose il brecciame doveva essere accuratamente lavato per ottenerne un buon impiego.

Il pietrame grezzo a *pezzatura artificiale* era ricavato dalla frantumazione di pietre locali o lavorazione di blocchi di cava. Stando agli enormi accumuli di scorie ancora visibili nell'area delle antiche cave sembra certo che si evitasse di trasportare questo materiale, preferendo utilizzare le schegge di risulta della seconda lavorazione fatta direttamente sul cantie-

re. I blocchi erano staccati dal banco con la *puntata*: essa prevedeva una fila di zeppe di legno o metallo alloggiate nel banco, le quali, battute contemporaneamente, provocavano il distacco del masso. La superficie veniva solo in parte regolarizzata con la sbozzatura da cui derivava il pietrame che si accumulava lì presso. In cantiere poi si effettuava l'ulteriore rifinitura (*compimento*) da cui si avevano le schegge (*assulae*) adoperate per la muratura. La forma schiacciata delle schegge le rendeva adatte all'allettamento a mano per piani orizzontali. Dalla frantumazione dei blocchi a perdere, o dallo spianamento dei banchi rocciosi derivavano invece poliedri a spigoli vivi meno adatti allo scopo.

Nel calcestruzzo con pietrame non allettato capitava spesso che le pietre si disponessero a capanna, lasciando dei vuoti. Questo fatto si riscontra spesso nelle cinte urbane di età repubblicana (Terracina, Palestrina, Fondi, Cori, Alba Fucente ecc.) e non dipende da frettolosità nel lavoro e ancor meno da incapacità delle maestranze. Penserei piuttosto che, siccome in questi casi il carico era molto modesto e le sollecitazioni connesse con operazioni belliche avevano direzione tangente o normale alle cortine, la presenza di "vuoti" nel conglomerato diventava irrilevante a fronte dell'economicità e rapidità di costruzione. Mi rendo conto che questo tipo di considerazioni toglie molto del valore che si attribuisce alle caratteristiche di confezione del calcestruzzo per fissarne la cronologia, tuttavia mi sembra prudente, in questo campo, tenere conto anche della funzione degli organismi edilizi e dei riflessi che essa può avere avuto sul sistema costruttivo.

I romani, almeno fino alla fine della repubblica, facevano grande attenzione all'affinità del pietrame con la calce impiegata; Vitruvio afferma infatti che la muratura migliore si otteneva con *caementa* della stessa pietra da cui era ricavata la calce. Naturalmente questo avveniva soprattutto nelle costruzioni di grande impegno. Opportunità di risparmio, infatti, hanno sempre spinto all'impiego di materiali di scarto, di seconda scelta, di risulta o di recupero nel conglomerato del nucleo, purché fossero compatibili con la sua buona riuscita. Il prevalere di un materiale rispetto all'altro ha favorito la tendenza a una definizione tipologica dei conglomerati antichi del tutto fittizia creando l'illusione di poterli datare sulla base del pietrame o su quella del colore della malta.

Una ricerca precisa di particolari pietrami si ebbe tuttavia solo per costruzioni fortemente specializzate come, per esempio, le cisterne, ma anche in questi casi la presenza di un materiale sta a significare più la funzione che la cronologia. Dunque, nella normalità, di una muratura in schegge di travertino o di selce, si potrà dire solo che nelle vicinanze, o lì stesso, si stavano lavorando quelle pietre.

Una scelta attenta si faceva invece nella dislocazione dei differenti materiali all'interno dell'organismo costruttivo: quelli a peso specifico più alto erano collocati nelle zone inferiori (fondazioni, piano terreno) mentre man mano che si saliva, si assottigliavano i muri e si mettevano in opera pietre più leggere. Di regola, almeno a partire dal I secolo a.C., nelle volte massive si adoperava il tufo, qualche volta misto al cappellac-

cio, tuttavia vi sono esempi famosi, come i grandi santuari repubblicani di Tivoli, Palestrina e Terracina dove nelle volte, anche di considerevole spessore, venne usato pietrame calcareo dello stesso tipo di quello adoperato per i muri con risultati più che soddisfacenti.

Tra i pietrami da muratura trasportati appositamente, pure da grandi distanze, erano la pomice (*pumex, spongia*) e la lava spugnosa (cruma) adoperate nelle sezioni superiori delle volte di luce grandissima (Pantheon) o in quelle anche di luce ridotta ma con monta molto ribassata (taberne del Foro di Cesare, navate laterali della Basilica Ulpia ecc.), oppure, anche se raramente fuori della regione di appartenenza, per *cubilia* dell'opera reticolata a disegni (cfr. par. 7.4.2). Fino alla metà del I secolo, come s'è visto, pare che si continuasse a importare anche la pozzolana, dai Campi Flegrei.

La pratica delle maestranze ha distinto le pietre da costruzione nel modo seguente:

1. *Argillose*: (ardesie, pietre ollari ecc.) mediocri per le murature. Sopportavano malamente l'esposizione sia all'acqua (si gonfiavano) sia al fuoco (indurivano). L'ardesia era usata, in combinazione con altri marmi, soprattutto per pavimenti e rivestimenti parietali.
2. *Calcaree*: (travertini, marmi, pietre di monte, dolomiti, alabastri, tufi calcarei ecc.); adattissime per ricavarne calce. Quelle più porose furono anche ottimo pietrame per conglomerato e scapoli per cortina.
3. *Gessose*: inadatte per la muratura in quanto fragili e deliquescenti; da esse si ricavava il gesso. Per lo più esso si importava dalla Siria, da Cipro, dalla Spagna. Plinio (*N.H.*, 36, 59) raccomanda di usarlo miscelato data la sua scarsa resistenza. Spesso si calcinavano i vecchi gessi per poterli adoperare di nuovo.
4. *Silicee*: (porfidi, graniti, lave, arenarie) ebbero largo impiego, a esclusione delle quarziti incapaci di legare con la malta. Se esposte a forte calore, mentre alcune non si alteravano, altre vetrificavano.
5. *Tufi*: usatissimi nelle diverse qualità, per la grande diffusione, la lavorabilità e le apprezzabili caratteristiche meccaniche. Nell'estrazione si cercava di evitare i banchi con carie o grossi inclusi di pomici, basalti ecc. L'oscillazione dei valori del carico di rottura tra i diversi tufi, compresa tra 10 e 280 kg × cmq (peperino di Gabi, detto pietra sperone o asperone) chiarisce l'ampiezza della versatilità di impiego di questa pietra.

La scelta del materiale da costruzione nel suo insieme era dunque determinante per la buona riuscita dell'opera. Tuttavia il fenomeno del riuso fu diffusissimo nell'antichità, sia a seguito di catastrofi come gli incendi e i terremoti, sia per speculazione. Anche se normalmente la capacità di presa con la nuova malta diminuisce in una pietra che fu già murata, alcune di esse, il *redivivus lapis* dell'Alberti, potevano riadoperarsi senza inconvenienti. Si tratta per lo più di quelle pesanti e sonore come la selce, il marmo, la pietra di monte e simili, tutte quelle globalmente individuate nell'antichità con il termine *silex*. Nei luoghi umidi si

cercava di evitare l'uso di materiale poroso come alcuni tufi, la testina di travertino ecc.

Anche la pezzatura del pietrame era importante; è noto che i massi di grandi dimensioni, se non sono imbevuti di acqua a sufficienza, quando vengono inseriti nel conglomerato assorbono rapidamente l'acqua della malta "bruciandola" e diminuendone la capacità legante (Alberti, *De Re Aed.*, III, IV, afferma che una pietra "giusta", cioè di media grandezza, immersa in un torrente impiega otto giorni per assorbire acqua fino all'interno). Oltre a questo, l'inserimento di elementi di grandi dimensioni alterava l'armonia del reticolo tridimensionale del legante, e accentuava la disomogeneità della struttura. D'altra parte, usando pietre maggiori del giusto le maestranze risparmiavano in tempo e lavoro, e quindi la tentazione di sottrarsi alla regola era forte.

A Pompei si hanno esempi ingegnosi di aggiramento delle regole corrette: grossi blocchi inseriti nelle cortine di opera incerta recano sulla superficie solchi che disegnano il profilo di scapoli minori; a stuccatura avvenuta la cortina di opera incerta risultava omogenea e sfuggiva al controllo del committente. Casi analoghi si riscontrano anche nell'anfiteatro maggiore di Pozzuoli: qui il normale tessuto dell'opera reticolata è sostituito qua e là da una specie di "spinapesce" di tufelli rettangolari che recano l'incisione a limitare i singoli *cubilia*. Il fenomeno doveva essere diffusissimo e, ovviamente, i committenti tendevano a cautelarsi con speciali clausole nei contratti. Un esempio è quello della *lex puteolana parieti faciundo* del 105/4 a.C. (CIL, 1781 = 2458) con cui si dispose che nella costruzione di un muro, certamente di opera incerta, non dovessero essere adoperate pietre che, asciutte, pesassero più di 15 libbre (= kg 5,85); un mezzo evidente per stabilirne le dimensioni massime, e che negli angoli non fossero più spesse di m 0,12 (questa è la misura prevalente delle bozze angolari di travertino del Santuario di Ercole a Tivoli, I sec. a.C.).

Un altro accorgimento importante fu quello di disporre i blocchi con i piani di stratificazione orizzontali, soprattutto quando si trattava di elementi ossaturali. Tuttavia vi sono casi, anche clamorosi, di applicazioni errate. Un esempio, i pilastri della fase augustea dei Rostri al Foro Romano; essi (m 0,60 × 0,60 × 2,80) furono messi in opera con le venature in verticale e ben presto fu necessario il consolidamento dell'intera struttura. Negli elementi sollecitati a pressoflessione, come gli architravi, il piano di giacitura doveva essere invece convenientemente posto in verticale (cfr. par. 3.1.1).

L'alta qualità delle murature romane è spesso stata attribuita a particolari segreti di confezione. Nella realtà è più logico pensare che il vero segreto sia stato la cura nella scelta e nella combinazione dei materiali, nel loro giusto dosaggio, nella stagionatura, nella lentezza della costruzione ecc. È vero infatti che in alcuni lavori evidentemente improvvisati, condotti al di fuori delle regole, si trovano diversi grumi di calce dovuti a cattivo spegnimento – cosa che succedeva di frequente con la calce molto grassa – e non a un difetto di mescola che invece era sempre molto curata. In queste murature la resistenza a compressione dai nor-

TABELLA 7.1
Tabella dei pesi dei materiali naturali per mc

Materiale	*Stato*	*Peso in kg × mc*
Ardesia		2.100/2.670
Argilla	asciutta	2.000/2.670
Argilla	appena cavata	2.670
Calcari leggeri		1.900/2.300
Calcari compatti		2.300/2.700
Calcari tufacei		1.200/2.000
Ghiaie (*glarea*)	in mucchio	1.550/1.800
Gneiss		2.600/2.800
Graniti		2.600/2.800
Marmi saccaroidi		2.600/2.800
Pietrisco da inghiaiare (*murices*, *glarea* per *rudus*?)	in mucchio	0.5 (del peso
Pietrame da muratura (*caementa*)		0.6 della pietra)
Pomice (*pumex*, *spongia*)	asciutta	500/700
Porfido		2.400/2.800
Pozzolana (*pulvis puteolanus*)		
— di Pozzuoli	asciutta	950/1.040
— di Roma	asciutta	1.120/1.150
Puddinghe		2.300/2.400
Sabbia fine (*harena*)	asciutta	1.400/1.650
Sabbia fine	umida	1.900/2.000
Sabbia grossa (*sabulum*?)	asciutta	1.350/1.500
Spugna vulcanica (*spongia*)		600/700
Terra silicea leggera	asciutta	1.300/1.400
Terra silicea forte	asciutta	1.700/2.000
Terra ghiaiosa	asciutta	1.400/1.700
Travertino (*lapis tiburtinus*)		2.200/2.500
Trachiti		2.400/2.800
Tufi vulcanici: Aniene (*lapis pallens*); Monteverde (*tofus ruber*, *saxum rubrum*); Grotta Oscura; Fidene; tufo sabazio, cimino, vulsinio, nocerino		1.100/1.800
Tufi Vulcanici: peperino di Albano, di Gabi		2.400/2.600

mali 11/8,6 kg × cmq scendeva fino a 2,5 kg (cfr. tab. 7.1; Leger, 1875, p. 80). Si riportano di seguito (tab. 7.2) alcuni risultati di esperienze condotte dal Rondolet su materiali antichi, desunti dal Leger (1875, p. 75).

TABELLA 7.2

Materiale	*Peso specifico × mc*	*kg × cmq*
Travertino I	2.358	298
Travertino II	2.254	226
Peperino	1.972	228
Lava basaltica	2.595	592
Tufi litoidi rossi e grigi	1.320	52

7.2. Materiali artificiali

7.2.1. Mattoni crudi (*lateres, lateres crudi*)

Vitruvio (2, 3, 1) ne illustra con particolari le modalità di confezione, le dimensioni (fig. 7.2 dis. 1), le caratteristiche di impiego e i vantaggi, non tralasciando, neanche in questo caso, di confermare la propria natura di *laudator temporis acti* con lodi sperticate per una tecnica evidentemente al suo tempo in abbandono almeno a Roma. Si rammarica infatti che le leggi impediscano di costruire pareti comuni più spesse di m 0,45, misura insufficiente per innalzare fabbriche a più piani in mattoni crudi (Vitr., 2, 8, 17), ma adeguata per ossature di "pilastri di pietra", e muri di mattoni cotti e conglomerato.

I muri esterni delle fabbriche in mattoni crudi dovevano essere coronati, sotto l'aggetto di gronda, di una specie di cordolo alto m 0,45 fatto di *structura testacea* (= frammenti di tegole) per proteggerli dalla pioggia nel caso che qualche tegola del tetto si fosse rotta (Vitr., 2, 18, 8). Questa protezione era chiamata *lorica testacea.*

I *lateres* erano fatti con argilla cretosa chiara, o rossa, oppure con sabbione maschio, evitando con cura il fango mescolato a sabbia o a ghiaietta, altrimenti non avrebbero retto alle intemperie. Dovevano essere fabbricati in autunno o in inverno in modo che asciugassero con lentezza fino all'estate successiva; quelli fatti d'estate essiccavano troppo in fretta in superficie e restavano molli all'interno, così, una volta messi in opera non reggevano il carico.

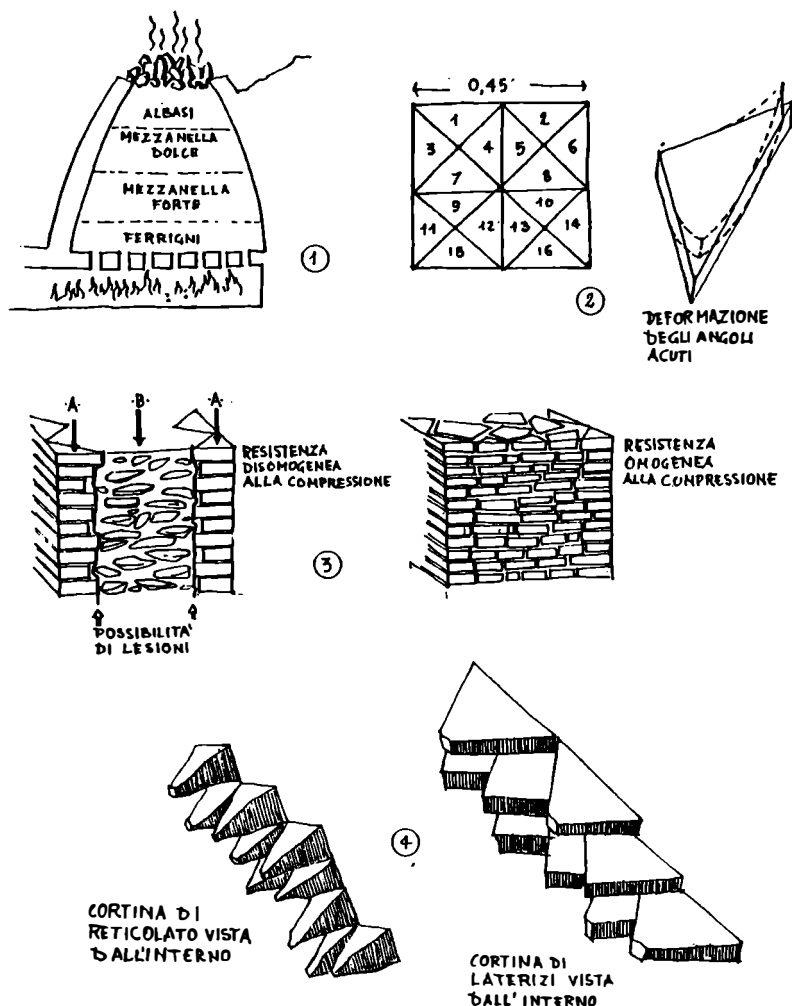
Se ne conoscevano tre tipi: il "lidio" (piedi 1 × 1,5 = circa m 0,45 × 0,30), usato anche in Italia; il *pentadoron* (quadrato, di 5 palmi di lato = circa m 0,375); il *tetradoron* (quadrato, di 4 palmi = circa m 0,30) esclusivi dell'ambiente greco.

Palladius (*Op. agr.*, 6, 12) nel IV secolo descrive un solo mattone di piedi 2 × 1 × 4 once di spessore (= cm 0,60 × 0,30 × 0,10) e sostiene che il periodo migliore per fabbricarli era il mese di maggio. La notizia prova che in ambiente agricolo erano ancora usati.

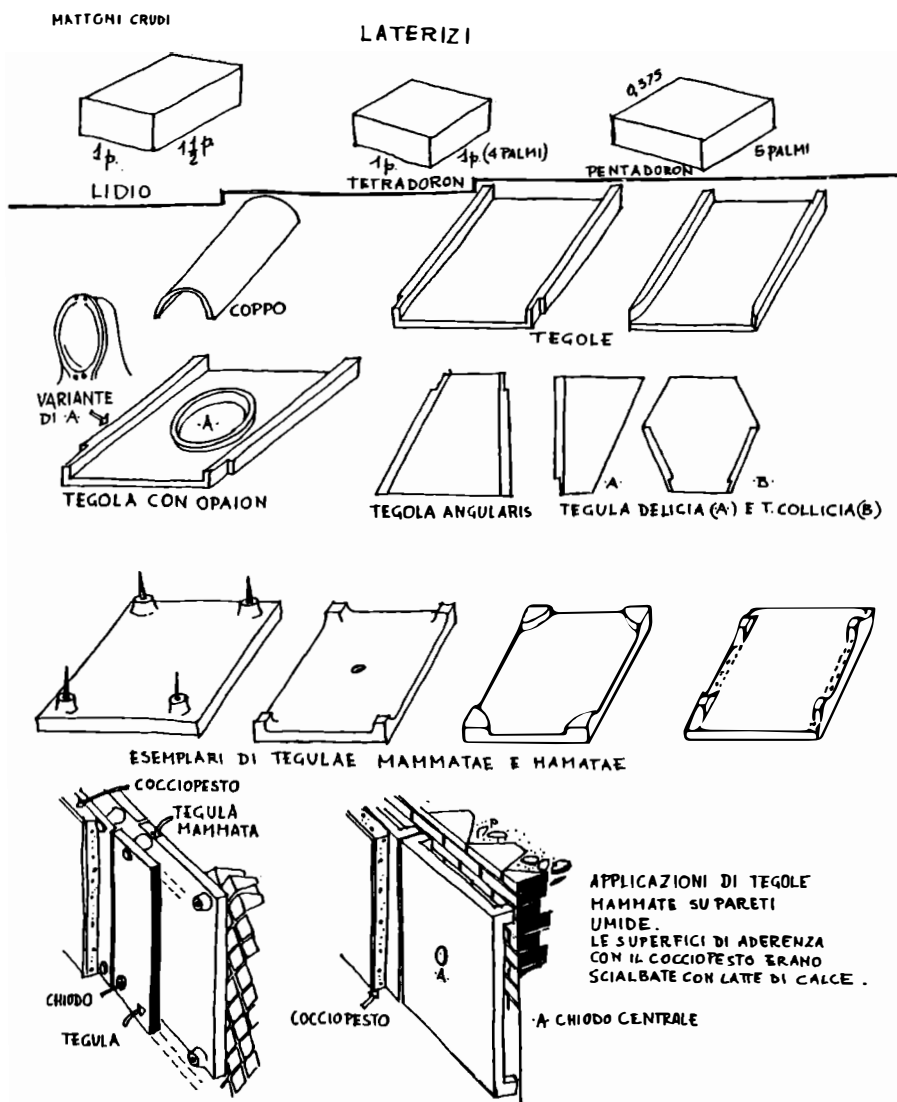
Per mattoni fatti con terra *pumicosa,* quindi tanto leggeri che, una volta asciutti, galleggiavano, usati in Africa e Spagna cfr. Plinio, *N.H.*, 35, 171; per le mura urbane di Arezzo e Bevagna, cfr. Plinio, *N.H.*, 35, 173.

7.2.2. Mattoni cotti (*testae, lateres cocti*)

I primi esempi di cortina laterizia furono confezionati con frammenti di tegole smarginate (età cesariana e augustea) e furono preceduti da strutture di tegole intere legate con malta di argilla (esempi, databili intorno al IV sec. a.C., se ne sono trovati a Lavinium). Vitruvio (2, 8, 19) sostiene che le tegole non buone per il tetto non sono adatte neppure a sopportare i carichi connessi alla muratura.

FIGURA 7.1
Cottura e messa in opera dei mattoni

I laterizi erano fabbricati con argilla impastata con acqua e spesso con sabbia, paglia o pozzolana fine in modesta quantità.

L'impasto veniva compresso a mano in una forma di legno: di norma si usava il quadrato (bessale = m 0,19/20, 2/3 di piede; sesquipedale = m 0,45 circa, 1 di piede e 1/2; bipedale = m 0,60 circa, 2 di piede).

FIGURA 7.2
Mattoni crudi e tegole

I mattoni venivano subito messi ad asciugare al sole, e in questa fase dovevano essere rivoltati spesso per evitare che si accartocciassero; l'essiccamento proseguiva poi ancora per parecchio tempo al coperto, in zona ventilata. Infine, appilati di taglio, essi cuocevano nella fornace a una temperatura sugli 800 gradi (fig. 7.1 dis. 1).

La loro qualità dipendeva, oltre che dall'impasto, dalla cottura. Il sistema empirico per verificare la buona riuscita era sempre quello di ascoltarne la risonanza alla percussione: un suono chiaro e argentino indicava il mattone buono, uno acuto e metallico, quello stracotto, mentre la crinatura o la cattiva cottura davano luogo a un suono fesso. La qualità dell'impasto si controllava invece sulla faccia fratturata: quello buono dava una grana fina, porosa e omogenea e quando veniva immerso in acqua assorbiva senza effervescenza, lentamente.

Naturalmente ogni cottura dava qualità diverse di mattoni che, con i termini dei fornaciai ottocenteschi, si possono definire:

— *ferrigno* (o ferriolo), troppo cotto perché collocato a contatto diretto col fuoco; legava male con le malte ma siccome era durissimo e fragile poteva essere usato nelle fondazioni o anche, in pezzi, nei nuclei murari;
— *forte*: nella fornace si trovava subito sopra il ferrigno e godeva dell'esposizione ottimale al calore. Era la qualità migliore, adattissima per gli archi, le volte, i punti di maggiore sollecitazione o anche in acqua;
— *dolce*: era al di sopra di quella forte; di qualità discreta era adatto anche alle cortine esterne, ma non in ossature particolarmente sollecitate né in acqua;
— *albasio*: di colore molto chiaro, era messo a coronamento della fornace e quindi non risultava cotto a sufficienza. Si usava per lavori provvisori o per muri interni e comunque non soggetti a carichi e spinte. Naturalmente era impiegato anche come *caementa*. In genere si trattava dei bessali.

La differente qualità presente in ogni "cotta" obbligava evidentemente a selezionare i laterizi, per destinarli ai diversi usi.

A Roma era regola che fossero fabbricati di forma quadrata, ma per le cortine venivano ridotti, o con la sega o con la martellina, in forma triangolare.

Più raramente si usava ridurli a rettangoli (fette) o a trapezi (che poi erano solo triangoli tronchi e spesso risultavano così dalla frattura del vertice a seguito del riuso; fig. 7.1 dis. 2).

L'incongruenza di fabbricare mattoni quadrati per poi usarli di forma diversa è solo apparente. Dipendeva dalla maggiore facilità di trasporto e di appilamento, e dal fatto che il quadrato si deforma meno nel periodo di essiccamento.

Le caratteristiche positive che favorirono la diffusione del laterizio furono: la forma regolare e costante, il peso specifico minore di quello di pietre di pari resistenza, la composizione e la struttura omogenee e più facilmente controllabili. E, in più, la consistenza porosa e leggermente scabra che facilitava grandemente l'aderenza con le malte nei piani orizzontali, e che qualche volta era aiutata anche da solcature fatte con le dita o con pettini di legno prima della cottura. Quando il mattone era confezionato male (difetti di cottura, di impasto, di for-

ma, presenza eccessiva di sabbia, lumachella, cretoni ecc.) tendeva a frantumarsi.

La messa in opera avveniva a mano, esercitando per ogni pezzo una leggera pressione, mai battendo con il manico della cazzuola come invece era normale per le pietre. Altrimenti poteva succedere che il laterizio si staccasse dalla malta ed era poi difficile che vi aderisse di nuovo.

Normalmente i romani non usavano i mattoni per tutto lo spessore del muro, ma si limitavano ad adoperarli nelle sue facce esterne (cortine) come contenitore del conglomerato. Così si otteneva certo una struttura meno resistente che non nella muratura ordinaria di solo laterizio, ma il risparmio era notevole (fig. 7.1 dis. 3).

Quando sulla struttura era previsto un carico molto elevato si ricorreva alla muratura omogenea di mattoni; all'interno naturalmente venivano collocati frammenti accostati il più possibile e disposti per strati orizzontali. La quantità di malta era ridotta sia nei letti sia nei giunti verticali (parte superiore delle fondazioni severiane all'interno dei Rostri di Augusto; pilastri lungo il decumano massimo di Ostia; pilastri di testa e muri neroniani venuti in luce tra il Colosseo e la *Meta Sudans*, resti sotto S. Carlo ai Catinari ecc.). Tutti questi prevedevano un'elevata resistenza alla compressione; e questo è un indizio utile per chi voglia "ricostruire" l'antico edificio.

Laterizi speciali, lavorati a cuneo per ridurre al minimo lo spessore dei letti di malta, erano messi di frequente nel settore superiore delle ghiere degli archi delle fabbriche di grande impegno; il sistema si incontra spesso a Ostia. Va detto, però, che di solito si ricorreva ai normali mattoni affidando la funzione di cuneo proprio al letto di malta che lungo il profilo estradossale poteva anche raggiungere spessore consistente. La fragilità era in questo caso compensata dall'ottima qualità del legante.

Lo sfraso risultante dal taglio dei laterizi era impiegato nella composizione delle malte idrauliche (cfr. par. 7.3.5) o del cocciopesto (cfr. par. 7.3.9) o anche mescolato nel conglomerato.

Non è facile stabilire se i mattoni fossero arrotati in cortina o a piè d'opera, né se lo fossero a secco o con acqua (cosa che avrebbe reso più compatta la superficie in vista). Certo che l'assoluta verticalità e perfezione di alcune cortine, specialmente romane e ostiensi, potrebbe far pensare a una arrotatura in parete.

Sembra anche che i giunti, quando erano provvisti di stilatura, fossero stuccati con la stessa malta usata come legante, e non con una più raffinata come accadeva per epoche più vicine a noi (XVI-XVIII secc.). È invece evidentissimo l'impiego di malta legante più o meno raffinata a seconda dell'impiego in parete o zone di risalto come portali, cornici ecc. (vedi i numerosi esempi delle facciate ostiensi). Non è accertato neanche l'uso costante di scialbare le cortine laterizie, come avvenne invece nel XVI-XVII secolo, anche se in molti casi si vedono mattoni, soprattutto nelle ghiere degli archi, dipinti in rosso. L'Uggeri (1802, p. 26) testimonia che ancora al suo tempo nel "Tempio del Dio Redicolo sull'Appia" le campiture gialle e rosse erano rafforzate, forse per omogeneizzarle, con scialbature dei rispettivi colori.

FIGURA 7.3
Tegole per rivestimento

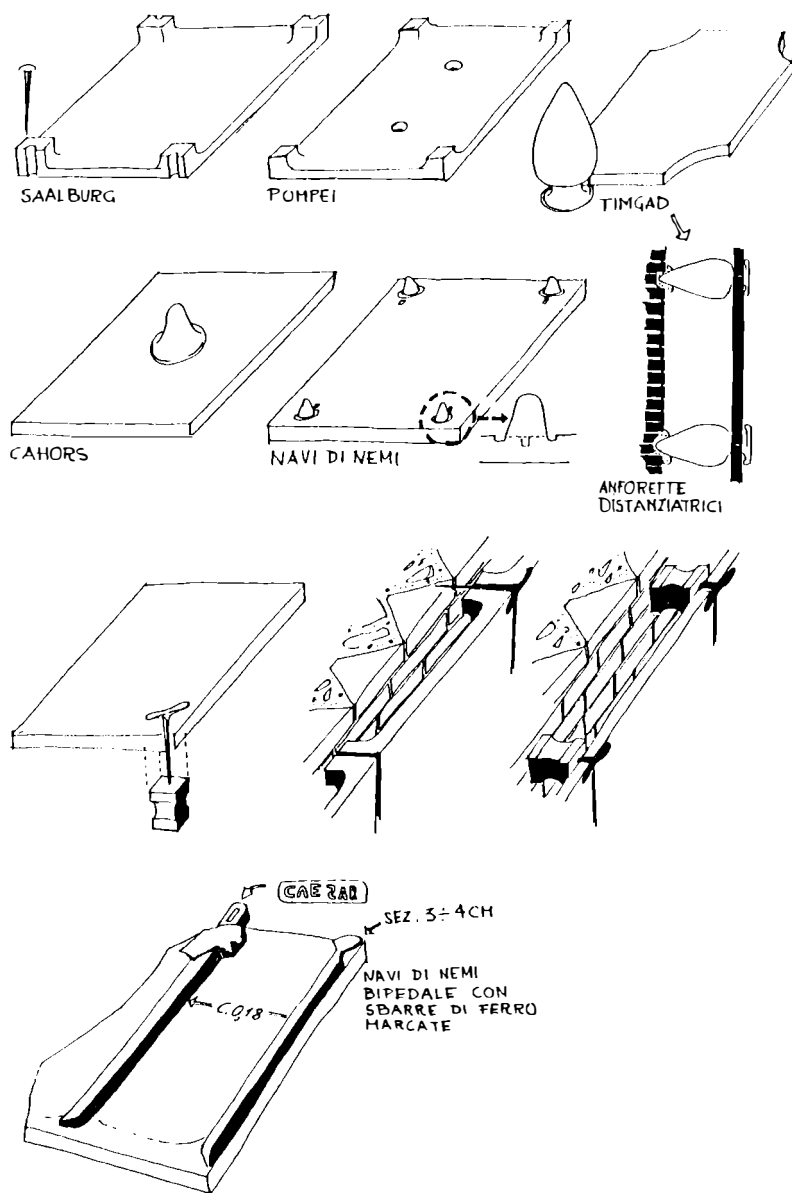



FIGURA 7.4
Laterizi comuni e speciali

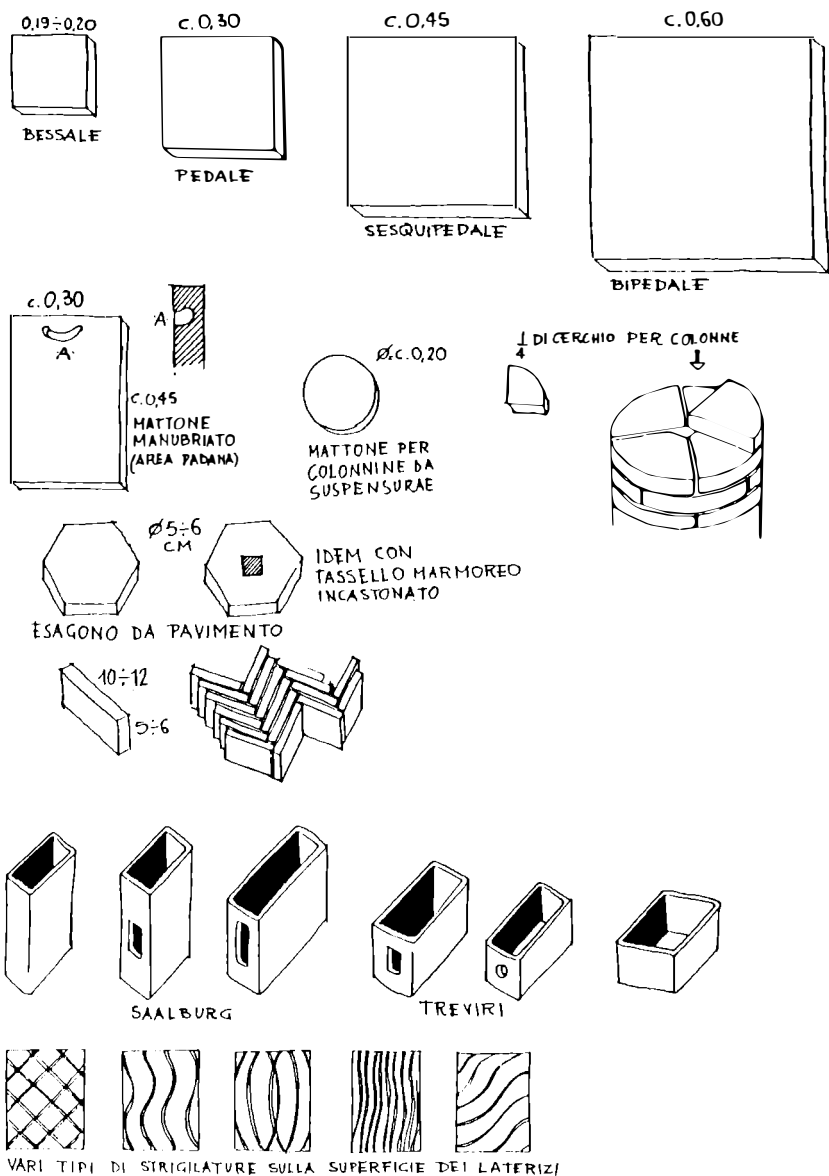
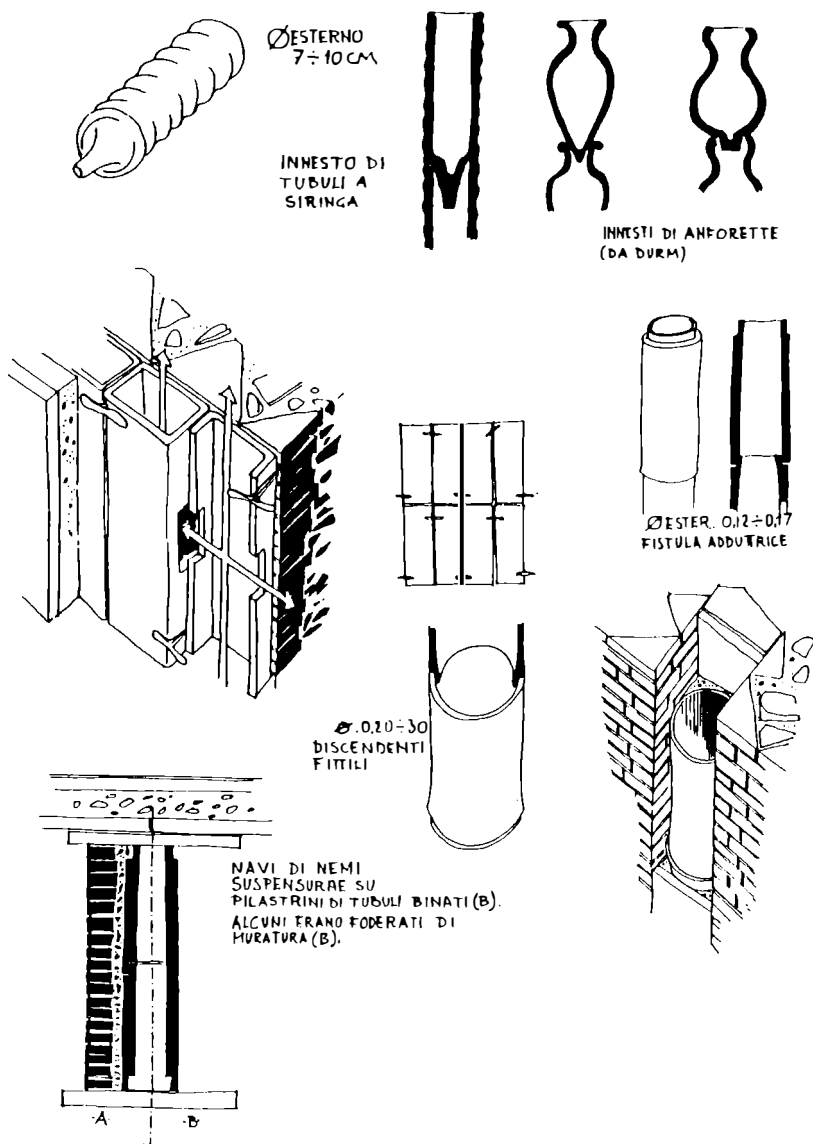



FIGURA 7.5
Tubuli laterizi

Qui di seguito è dato l'elenco di alcuni materiali di terracotta usati nell'edilizia antica (figg. 7.2-7.5):

a) mattoni crudi (*lateres, lateres crudi*);
b) tegole curve (*imbrices*) normali e da colmareccio;
c) tegole piane (*tegulae*):

— *tegulae mammatae, hamatae*;
— *tegulae angulares*;
— *tegulae deliciae*;
— *tegulae colliciae*;

d) mattoni cotti (*lateres cocti, tegulae, testae*):

— bessali (cm 19/20; *laterculi*);
— pedali (cm 30 circa) praticamente ignoti a Roma e dintorni;
— sesquipedali (cm 45 circa);
— bipedali (cm 60 circa);
— mattoni manubriati (con la presa a maniglia);
— tasselli per *opus spicatum*;
— mattoni cilindrici per *suspensurae*;
— mattoni a 1/4 di cerchio per colonne;
— mattoni speciali per ghiere;
— mattoni trapezoidali;
— tubuli a siringa;
— tubuli parallelepipedi per riscaldamento;
— tubi cilindrici per discendenti per acque pluviali;
— anfore per discendenti, per alleggerimento delle volte, fodere di canne fumarie ecc.

7.3. Malte, smalti e murature

7.3.1. La calce

La calce come risultato della cottura della pietra era nota in Siria, Fenicia, Cipro e Grecia fino dal V, se non dal VI, secolo a.C. In Medio Oriente era derivata per lo più dal gesso, in Grecia e in Italia dal calcare. Essa costituì per molto tempo la base di "mastici" adoperati per usi particolari come l'applicazione di gemme a mobili oppure come vero e proprio smalto nella decorazione (*tìtanos*). Esiodo (*Scutum*, 141 ss.) ne accenna a proposito dello scudo di Eracle: forse si trattava di un miscuglio di calce, gesso, chiara d'uovo e caseina.

Teofrasto (*De lapid.*, fragm. 2, 49, 69) testimonia che tra il IV e il III secolo a.C. dal Medio Oriente e da Cipro veniva importata in Grecia la *konìa*, cioè la pietra cotta (= calce viva) impiegata per gli stucchi e per usi agricoli. Naturalmente questi commerci, come in genere il trasporto della calce viva, erano grandemente rischiosi. Sempre Teofrasto racconta di una nave carica di calce e di stoffe che si incendiò e affondò perché l'acqua, penetrata nella stiva, aveva reagito con la calce sviluppando temperature elevatissime e grande aumento di volume.

La calce si otteneva attraverso la cottura di una delle tante varietà di pietra calcarea (carbonato di calcio discretamente puro) e fu l'unico tra i cementanti che, dopo la cottura (*calx cocta*) fosse suscettibile di *spegnimento* in presenza di acqua.

I tipi di calce sono due:

— *aerea*: capace di far presa solo a contatto con l'aria (sembra che in antico fosse nota solo questa);
— *idraulica*: capace di far presa sia nell'aria sia nell'acqua; i Romani non la conoscevano (cfr. Frizot, 1975) e usavano la *malta idraulica* (cfr. par. 7.3.5).

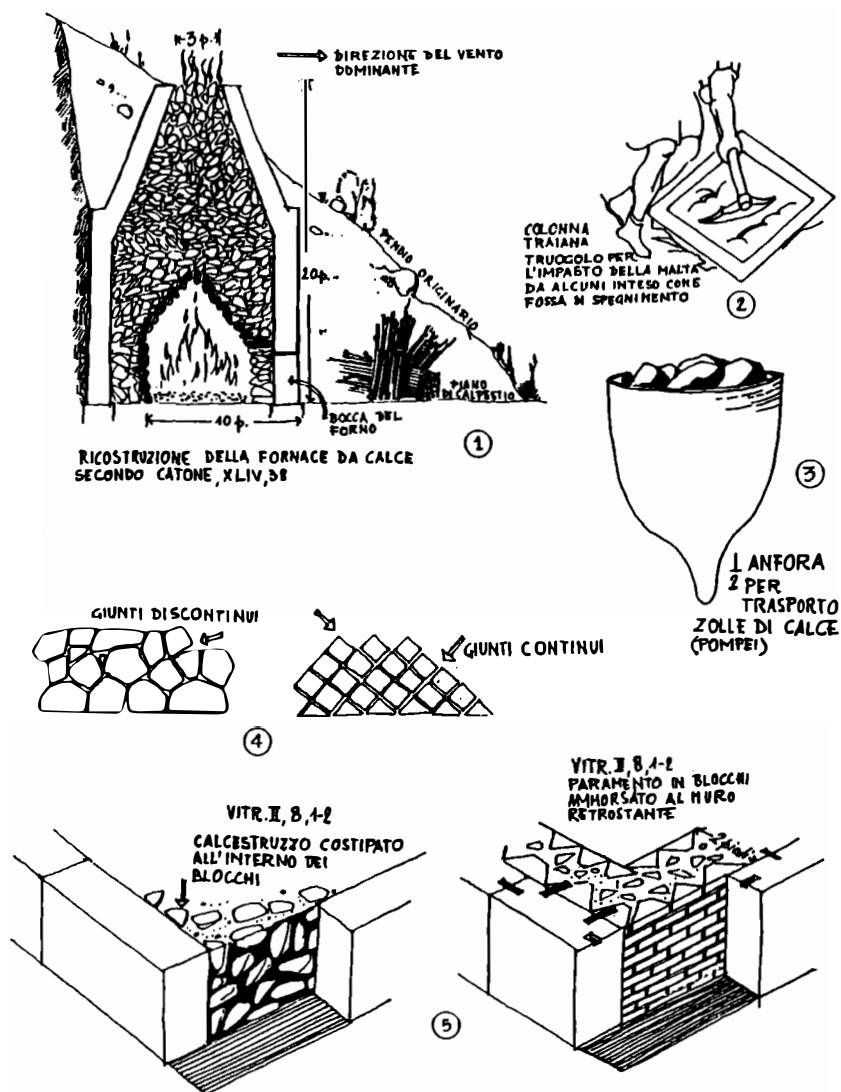
La calce ($CaCo_3 \rightarrow CaO+CO_2$) alla cottura si liberava anidride carbonica (CO_2) pari a circa il 44% con contrazione del peso iniziale (ma non del volume) della pietra da 1/10 a 1/5. Restava *ossido di calcio* (CaO), detto appunto *calce viva* (*calx viva*) (Plinio, *N.H.*, 36, 181; chiama *glaeba* la zolla di calce viva).

I forni più antichi erano semplici cavità nel terreno. Alla cottura erano destinate maestranze specializzate (cfr. editto di Diocleziano, in Mommsen, 1883, p. 21) in cui è citato il *coctor calcis*. L'Adam (1984, 69) cita tre sistemi di cottura nel bacino del Mediterraneo: in forno con focolare alla base, in forno par appilamento di materiale e su aia esterna. La notizia più importante per la struttura del forno antico si trova in Catone (*De Agr.*, 38, 1-4):

Costruite il forno largo 10 piedi [= m 3 circa], alto 20 [= m 6 circa]; alla sommità dovete ridurre la larghezza a soli 3 piedi [= m 0,90 circa]. Se cuocete con una sola bocca sarà necessario praticare all'interno una grande cavità, sufficiente a contenere la cenere, così che non debba mai essere estratta, e costruite con molta cura il forno facendo in modo che il fondo ne occupi l'intera estensione. Se invece cuocete con due bocche non ci sarà alcun bisogno della cavità; quando bisognerà estrarre la cenere la tirerete fuori da una delle due bocche mentre l'altra manterrà il fuoco. Fate attenzione a che il fuoco non si spenga mai neppure di notte. Caricate il forno con pietre di buona qualità, le più bianche e le meno porose possibili. Costruendo la fornace date alla cappa una forte inclinazione; quando avrete scavato a sufficienza disponete il piano del focolare in modo che sia quanto più possibile infossato e riparato dal vento. Se non avete il posto per fare un forno molto profondo costruite la parte alta in mattoni o in pietre con malta e rivestite l'esterno della sommità. Se quando avrete acceso la fiamma dovesse uscire anche da altri punti oltre che dall'occhio superiore, bisognerà che li chiudiate con la malta. Badate che il vento non entri mai dalla bocca del forno, soprattutto se soffia da meridione. Ecco cosa vi indicherà che la calce è cotta: quando le pietre in alto saranno cotte, e quelle in basso, anch'esse cotte, allora si schiacceranno e la fiamma fumerà meno. [Cfr. fig. 7.6 dis. 1].

La calce viva era trasferita in apposite vasche, dette di *spegnimento*, e immersa nell'acqua. Iniziava allora una reazione molto violenta, durante la quale si sviluppava calore che spesso raggiungeva i 300 gradi. Una parte dell'acqua evaporava, mentre il resto veniva assorbito dalla calce che si spappolava, aumentando fortemente di volume. A ciclo concluso si aveva la *calce spenta* ($CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ = idrossido di calcio).

La rappresentazione di un'antica fossa di spegnimento l'abbiamo for-

FIGURA 7.6
Calce e muratura

se nei rilievi della Colonna Traiana (fig. 7.6 dis. 2) (Orlandos, 1966, I, fig. 83). Il trasporto dalla fossa al truogolo per l'impasto avveniva con appositi recipienti di legno o metallo, antenati della "cofana", o con mezzi di fortuna, come le mezze anfore trovate in un cantiere di Pompei (fig. 7.6 dis. 3).

Dalla calce spenta, con successive aggiunte di acqua si otteneva:

— il *grassello* (*calx macerata*): pasta bianca, densa e untuosa che essiccava all'aria con grosse fessurazioni. Mantenuta pura, poteva, se ribagnata, tornare allo stato di grassello;

— il *latte di calce*: poltiglia meno consistente del grassello (20 ÷ 30% di acqua e il resto di calce), utilizzata per la tinteggiatura. A questo scopo era adatta particolarmente la calce grassa (cfr. sotto);

— l'*acqua di calce*: soluzione limpida, anche disinfettante. Le sue proprietà medicinali erano ampiamente note agli antichi (Plinio, *N.H.*, 36, 180).

La calce inoltre si distingueva in due tipi.

1. *Calce grassa* (o dolce: *calx pinguis*) derivata dal calcare puro, assorbiva 2,5 ÷ 3 volte il proprio peso in acqua gonfiandosi moltissimo. Lo spegnimento avveniva con grande rapidità sviluppando alta temperatura. Era adatta soprattutto per gli impieghi in luoghi coperti e riparati o per gli intonaci, però solo dopo che fossero passati almeno tre mesi dallo spegnimento per evitare la formazione dei calcinaroli o bottaccioli, piccoli nuclei di calce non spenta, o spenta male, che provocavano col tempo scoppiature nell'intonaco. Dato che tirava molto lentamente, questo tipo di calce avrebbe rallentato la costruzione, non potendosi passare alle rifiniture prima di un sufficiente indurimento, senza il rischio di screpolature, strapiombi, assestamenti discontinui ecc. La calce grassa era però adatta a confezionare la *malta idraulica*.

2. *Calce magra* (*calx macra*): si otteneva da calcare impuro; durante lo spegnimento non si gonfiava troppo dato che assorbiva solo da 1 a 1,5 volte il proprio peso in acqua.

Vitruvio (2, 5, 1 ss.) conferma quanto si desume dalla tradizionale pratica dei cantieri; egli consiglia di prendere molta cura della calce «sia che venga cotta da pietre bianche [calcari] sia da quelle silicee». E aggiunge: «Quella che verrà ricavata da materiale compatto e più duro, sarà utile per la muratura, mentre quella che deriverà dalla pietra spugnosa servirà per gli intonaci».

Accenna poi (2, 5, 3) anche a una sorta di analisi quantitativa in atto già ai suoi tempi:

le pietre di un dato peso, introdotte in fornace, una volta estratte non possono più corrispondere ad esso; ma, pesandole, pur restandone uguale la dimensione, si troveranno ridotte di circa 1/3 del peso originario per l'umidità evaporata. Così, a causa del fuoco, si saranno aperti i vuoti e le cavità e questi accoglieranno in sè la miscela di sabbia diventando compatti e, tirando, faranno corpo unico coi *caementa* e determineranno la solidità della struttura.

Catone (*De Agr.*, 38, 2; e in Plinio, *N.H.*, 36, 174) sconsiglia calcine ottenute da pietre molto diverse tra loro, come pure quelle derivate dalla *selce* (intende pietre troppo dure o addirittura il basalto?) e aggiunge che i tufi non sono di alcuna utilità allo scopo. Plinio (*N.H.*, 36, 169) nota che le pietre di colore verde, risultando quasi sempre resistentissime al fuoco, sono inadatte a fare la calce.

La calce che non riusciva di buona qualità veniva usata nelle fondazioni piuttosto che nell'alzato, nel nucleo meglio che nella cortina, nei muri interni invece che in quelli di telaio. Ancora nel XVIII secolo (Uggeri, 1802, p. 19) la calce tratta da pietra spugnosa veniva destinata agli intonaci. Così nell'Italia settentrionale, dove c'era largo uso di ciottoli di fiume, se ne produceva di due qualità: dai ciottoli grigi quella scura adatta alla costruzione, e da quelli chiari la calce bianca per gli intonaci.

La calce usata a Roma proveniva dai monti Tiburtini, Prenestini e Cornicolani dove si trovano ottime vene di calcare bianco e fragile, tanto compatto quanto poroso, adatto per le murature e gli intonaci.

7.3.2. Sabbia (rena; *(h)arena, sabulum*)

È un materiale allo stato granulare (da 1/16 di mm a 2 mm) risultante dalla decomposizione di pietre differenti; in genere contiene una notevole percentuale di silice).

Vitruvio (2, 4, 1 ss.) ne parla diffusamente:

Per le strutture cementizie prima di tutto si deve cercare la sabbia (*harena*) idonea a formare la malta e che non contenga terra. I generi di sabbia di cava (fossile) sono: nera, bianca, rossa e carboncino. Tra queste sarà ottima quella che, battuta e sfregata nella mano, scricchiolerà ruvida. Così come sarà adatta quella che, posta su un telo bianco e poi gettata via o battuta, non lo avrà sporcato né avrà lasciato residui terrosi. D'altra parte in mancanza di cave si potrà prenderla dai fiumi od ottenerla setacciando la ghiaia, oppure raccogliere dalla spiaggia marina. Ma la malta di sabbia marina fa presa lentamente e non regge il carico continuo: il muro riesce difettoso se durante la costruzione non si lascia riposare. Questa malta comunque è inadatta a reggere le spinte delle strutture voltate, e inoltre tende a disgregare gli intonaci trasudando salsedine.

Le sabbie di cava tirano più rapidamente nelle murature e gli intonaci restano aderenti. Sono inoltre adatte a sostenere il peso delle volte a patto che siano cavate da poco tempo. Infatti se restano a lungo esposte, corrotte dal sole, dalla luna e dalla brina, si disaggregano e diventano terrose. E quando vengono miscelate nella muratura non trattengono il pietrame che si ammassa e i muri non riescono più a sostenere i carichi. Tuttavia le sabbie fresche di cava, che pure hanno tanti pregi nella muratura, non ne hanno altrettanti negli intonaci perché la malta con sabbia grassa, mescolata alla paglia, non può asciugarsi senza fessurarsi. Mentre la sabbia di fiume, magra, è utile negli intonaci che acquistano solidità con le battiture delle spianatoie, come nell'*opus signinum* [cfr. par. 7.3.10].

In tempi recenti si riteneva che le sabbie fluviali e quelle torrentizie fossero da preferire a quelle fossili provenienti da giacimenti fuori alveo, e che quelle grosse fossero migliori di quelle fini (Baggi, 1926, p. 182). Nelle strutture di grande impegno, poi, la sabbia andava prima lavata e adoperata asciutta; una speciale attenzione nel lavaggio in acqua dolce era necessaria quando si usava sabbia di mare.

7.3.3. Pozzolana (*pulvis puteolanus*)

È un prodotto di deiezione vulcanica in forma di lapillo minuto: in antico sembra si cavasse per lo più in cunicoli. Normalmente, se unito a grassello nella proporzione di 3 a 1 dà malta idraulica.

I migliori giacimenti di pozzolana in Italia sono quelli dei Campi Flegrei (colore grigio chiaro) e quelli della campagna romana (colore nero, grigiastro, rosso violaceo). L'efficacia della pozzolana è legata all'antichità della deiezione: quella recente, come del resto quella alterata, perde le proprietà leganti.

Vitruvio (2, 6, 1 ss.) ne parla così:

> C'è un genere di polvere che fa per sua natura cose ammirevoli. Nasce nella zona di Baia, nei municipi alle falde del Vesuvio. È una polvere che mescolata a calce e sassi, non solo conferisce solidità agli edifici comuni, ma permette anche alle strutture gettate in mare di far presa sott'acqua.

Dopo una lunga digressione sull'origine della pozzolana e del suo legame con le manifestazioni vulcaniche, egli nota che in Etruria, dove pure ricorrono tutte le caratteristiche dei Campi Flegrei, essa non si trova; c'è invece il "carboncino" egregio per le murature in terraferma, ma inadatto a far presa in acqua (2, 6, 4). Riferimenti alla pozzolana ne abbiamo anche in Plinio (*N.H.*, 35, 13, 166), Seneca (*Quaest. Nat.*, 3, 20), Strabone (*Geogr.*, 5).

È strano che Vitruvio non accenni all'ottima pozzolana di cui era ricchissima la campagna romana, e di cui è certo che fossero già coltivate le cave come dimostra il loro impiego della varietà nera in monumenti come il Santuario di Ercole a Tivoli.

7.3.4. Preparazione della malta (*materia, materies, (h)arenatum, maltha*)

Il termine malta indica genericamente un impasto di più elementi: terra argillosa e graniglia o paglia (malta di terra semplice) oppure terra ad alto contenuto di calcio mescolata a inerti (*taio* siciliano, *tapial* spagnolo; Plinio, *N.H.*, 35, 169) o calce e sabbia o pozzolana (*materia ex calce et harena*), sia aerea, sia idraulica, alla malta di gesso e/o calce, mista a polvere di marmo e un qualche collante (stucco, smalto, *opus albarium*; Vitr., 7, 3, 3). La malta di terra fu abbastanza usata nell'antichità: si pensi ai nuraghi e alle strutture agricole di cui rimangono tracce (per esempio, i muri di tegole e argilla di Pratica di Mare o resti, anche se labili, di murature con legante di terra inglobate in fasi imperiali nella Villa Adriana e ancora inediti).

La malta di calce è però quella che ci interessa di più. Il problema che sembra aver maggiormente appassionato l'archeologia è ancora una volta la definizione cronologica della sua nascita. Non che la questione sia davvero importante, ma, almeno per dovere di cronaca, se ne dovrà accennare. La posizione generalmente accettata è quella del Lugli (1957, pp. 363 ss.; cfr., da ultimo, Adam, 1986, p. 82) per cui l'uso dell'opera cementizia si diffuse a Roma e in Campania a partire dalla fine del III

secolo a.C. su influenze orientali ed ellenistiche (cfr., soprattutto, Adam, 1986). Questo tuttavia contrasta con quanto afferma l'Orlandos (1966, p. 135, n. 2) che, citando precisi riscontri archeologici (Delo, Thera, Priene), sostiene che in Grecia la malta, usata come legante, non risale oltre la fine del II o l'inizio del I secolo a.C. Prima il solo legante era l'argilla, e la malta di calce si deve quindi considerare un apporto romano. Soltanto in particolari strutture destinate al contatto con l'acqua, come moli o cisterne, (Delo, Thera, Laurion) si è trovato un legante formato da una miscela di calce, sabbia e una sorta di pozzolana (terra di Santorino). Le fonti letterarie ed epigrafiche, del resto, non ci sono di grande aiuto e le ritroviamo tutte elencate dal Lugli (1957) e parzialmente riprese dall'Adam (1986). Comunque non risalgono oltre la metà del II secolo a.C.

Determinanti sono le indicazioni archeologiche: anche a voler trascurare i casi di colonie di datazione certa come Alba Fucens (303 a.C.) o Cosa (273 a.C.) oppure ad alcune case pompeiane che sembrano attestare l'uso della malta di calce con funzione legante fin dall'inizio del III secolo a.C., non possiamo ignorare il caso della *Porticus Aemilia*. Livio (35, 10) dice che la costruirono L. Emilio Lepido e L. Emilio Paolo nel 192 a.C. e che successivamente, nel 174, venne "ricostruita" da Q. Fulvio Flacco e A. Postumio Albino che «*porticum Aemiliam reficiendam curaverunt*» (Liv., 41, 27, 8).

Si tratta di un edificio lungo 487 m e largo 60 diviso in 50 vani paralleli larghi m 8,30, coperti con settori rialzati di volte a botte e divisi da elementi murari assimilabili a pilastri. La tecnica usata è il calcestruzzo in abbinamento con l'opera incerta di tufo. Se pensiamo alla superficie coperta di quasi 3 ettari, allo sviluppo longitudinale e alla collocazione su un terreno fondale infido come quello della riva del Tevere, non possiamo negare che si tratti di una realizzazione di straordinario impegno progettuale e cantieristico. Per realizzarne la costruzione, considerando anche il tiro delle malte, non occorsero certo meno di 20 anni. Proprio per questo forse le due date vanno interpretate, più che come la costruzione (192 a.C.) ed il rifacimento (174 a.C.), come l'inizio della costruzione ed il suo collaudo. È probabile che il *reficiendam* fosse giustificato dai restauri resi necessari dagli assestamenti in corso d'opera inevitabili in una fabbrica tanto vasta realizzata nelle condizioni meno propizie. Dobbiamo ricordare poi che si verificarono terremoti nel 192 (38 giorni; Liv., 35, 40) e nel 179 (Liv., 40, 59), che possono aver danneggiato la fabbrica in costruzione.

Questo per dire che se nel 192 a.C. si era in grado di progettare e realizzare un edificio di quelle caratteristiche (e se poi i resti pervenutici fossero del 174, la differenza nel nostro ragionamento sarebbe irrilevante) l'inizio della tecnica del cementizio non può collocarsi solo due o tre decenni prima. È più realistico pensare almeno a un secolo se non di più.

Basta dunque questa sola testimonianza materiale per collocare i primi esempi seri e complessi di fabbriche in calcestruzzo di calce, rena e/o pozzolana, alla fine del IV secolo, o, a essere ottimisti, ai primissimi del

III. Quindi delle due l'una: o stiamo datando malamente i resti della *Porticus Aemilia,* cosa allo stato attuale delle conoscenze improbabile, oppure non siamo in grado di riconoscere gli esempi di murature in conglomerato precedenti l'inizio del II secolo, che pure devono esistere.

La malta comune è un impasto di sabbia (2 parti in volume), grassello (1 parte) ed acqua. Si ha *malta grassa* quando nell'impasto c'è poca sabbia e *magra* nel caso contrario (si deve fare attenzione a non confondere la *malta grassa* e *magra* con la *calce grassa* e *magra* per cui, cfr. par. 7.3.1).

Il grassello, che da solo ne era privo, acquistava capacità leganti con l'aggiunta di sabbia, ghiaietta o brecciolino (per esempio: Spalato, Bevagna, Cori ecc). che non faceva avvertire le contrazioni per lo scarico minuto delle tensioni in corrispondenza di ogni granello.

La *presa* o *tiro* è l'insieme dei fenomeni presentati dalla malta dopo la messa in opera, e che determinava la saldatura con le varie pietre del conglomerato. Siccome la muratura ha bisogno di molto tempo (a seconda dello spessore anche diversi anni) per tirare completamente, risultava più vantaggiosa la calce magra a presa più rapida dell'altra.

La presa avveniva per fasi successive:

— *I periodo*: *essiccamento,* durante il quale la malta perdeva l'acqua d'impasto;
— *II periodo*: *carbonatazione,* fenomeno per cui la calce spenta ($CA(OH)_2$) si convertiva in carbonato di calcio ($CaCO_3$) combinandosi con l'anidride carbonica (CO) dell'aria. Naturalmente occorreva parecchio tempo perché l'aria arrivasse per capillarità nell'interno del muro. In occasione della demolizione di grandi strutture di età medievale si è constatato che la malta all'interno non era ancora carbonatata perfettamente;
— *III periodo*: *cristallizzazione* del $Ca\ CO_3$ con la quale si raggiunge la saldature e il consolidamente del composto.

L'esame dei campioni di vecchie malte ha fatto pensare anche a fenomeni di silicatizzazione per via della silice contenuta nella sabbia, ma per esserne certi bisognerebbe disporre della conoscenza analitica del materiale prima della messa in opera.

7.3.5. Malta idraulica

Come certamente si è capito per i diversi accenni fatti finora, l'*idraulicità* è la proprietà che consente alla malta di far presa più o meno rapidamente anche sott'acqua.

In antico questo si raggiungeva mescolando calce grassa e pozzolana, oppure calce, sabbia e frammenti minutissimi, o polvere, di laterizio. La malta così ottenuta era in grado di iniziare la presa dopo un periodo di 4 giorni anche se completamente immersa in acqua. Del resto la malta pozzolanica in acqua è un sistema in continua evoluzione, con reazioni molto complesse. La calce stessa, dopo aver modificato la pozzolana, si

scompone per dilavamento e lascia una scheletro compatto di geli induriti e silicati idrati, chimicamente e fisicamente inattaccabili.

7.3.6. La mescola

Di seguito si riportano le proporzioni attuali in volume per malte con pozzolana e/o cocciopesto a confronto con le prescrizioni antiche:

Proporzioni attuali

Calce grassa in pasta	Sabbia	Pozzolana
1	1	1
1	–	2
2	5	2,5

Più dettagliatamente le malte pozzolaniche "romane", fino all'inizio del secolo, erano confezionate nelle proporzioni seguenti:

	Calce	Pozzolana
Muratura ordinaria di mattoni	3	7
Muratura ordinaria di calcestruzzo	1	3
Muratura ordinaria di tufo	1	4,5

Proporzioni antiche

Calce aerea grassa in pasta	Sabbia di cava	Sabbia di mare o di fiume	Pozzolana	Sabbia di mare o di fiume e frammenti di laterizio
1	3			
1		2		
1			2	
1				3 (2 sab. + 1 lat.)

Vitr., 2, 5, 1; Plin., *N.H.*, 36, 175.

Plinio (*N.H.*, 36, 176) dice che molte fabbriche di Roma crollavano perché gli appaltatori lesinavano sulla quantità della calce da mescolare alla rena, a scapito della coesione con il pietrame.

Malta per conglomerato da cisterna

Calce aerea in pasta	Sabbia di cava
2	5

si tratta dell'*opus signinum* (cfr. par. 7.3.10), nel quale all'inizio non compariva neppure la pozzolana.

I romani, potendolo, impiegavano malte pozzolaniche anche quando non occorreva alcuna idraulicità del composto, questo per la migliore riuscita del legante e per evitare gli inconvenienti delle gelate durante la costruzione. Il sistema restò praticamente invariato per tutto il Medioevo e l'età moderna, ma certo la qualità delle malte riscontrabili in territorio romano laziale in età antica si è difficilmente ripetuta. La differenza si deve tutta alla minore cura nella scelta dei materiali, della loro combinazione, nella trascuratezza del particolare, nella minore stagionatura ecc. Del resto, anche in antico, uscendo dal territorio romano-laziale, si avverte un consistente abbassamento della qualità dei conglomerati. Per convincersene basterà confrontare i calcestruzzi di Roma, di Ostia o anche di uno qualunque degli altri paesi del Lazio, con quelli di Pompei o Ercolano. Anche l'Adam (1983) rimarca la pessima qualità della malta pompeiana. A proposito della malta Vitruvio (2, 5, 1 ss.) dice:

> Quando la calce sarà spenta, la malta deve essere così mescolata: se la sabbia sarà di cava si metteranno insieme 3 parti di sabbia e 1 di calce; se invece la sabbia sarà di fiume o di mare, se ne mescoleranno 2 parti con 1 di calce. Questo sarà il giusto modo di comporre la miscela. Se, avendo a disposizione sabbia di fiume o di mare, si aggiungerà una terza parte di frammenti di laterizio pestati, si otterrà una malta migliore.

(Si noti che non fa alcun riferimento all'*opus signinum*).

Quando il materiale da murare richiedeva malta fine e fluida bisognava setacciare la sabbia o la pozzolana, mentre se serviva malta grossa occorreva mescolare alla sabbia la metà in volume di ghiaia a grani poliedrici, o in mancanza d'altro anche di ghiaietta fluitata (Spalato). La malta sottile e fluida serviva per punti particolari come le ossature, i legamenti, le cornici e nell'uso delle pietre da taglio levigate, mentre i riempimenti sopportavano anche miscele più grossolane.

Nella preparazione della malta avevano grande importanza anche la qualità, la quantità e la temperatura dell'acqua destinata all'impasto. L'acqua più adatta era quella limpida, pura e dolce: la migliore in senso assoluto quella piovana, purché depositata, seguita da quella di fiume, di lago e, per ultima, da quella di pozzo. Anche l'acqua di mare poteva essere usata, ma rallentava la presa. È ovvio che se la costruzione da farsi era collocata in mare questo non aveva importanza.

Per la quantità, l'esame dei conglomerati antichi suggerisce un largo impiego di acqua in modo che l'impasto, risultando liquido, riempisse tutti i vuoti aderendo bene al pietrame e asciugasse lentamente. E in questo la realtà archeologica è supportata dalle fonti.

L'abbondanza di acqua nell'impasto è un altro elemento che differenzia il conglomerato antico da quelli successivi. Un vecchio detto infatti affermava che a fare una buona malta sarebbe stato sufficiente il sudore dell'uomo che impastava, a patto che lo facesse bene e a lungo. In verità la quantità era strettamente legata al tipo di impasto e alle caratteristiche della calce impiegata, oltre che alle condizioni climatiche e di ventilazione del momento; comunque era sempre raccomandabile non far stagnare l'acqua sul mucchio della malta già confezionata. È d'altra parte intuibile

che nelle strutture di grande impegno non si doveva esagerare con l'acqua, anche se questo facilitava il lavoro, in modo da contrarre al minimo i tempi di rilascio e da poter far avanzare la fabbrica con la rapidità imposta dalle leggi economiche.

Riguardo alla temperatura, è noto che l'acqua calda accelerava la presa ma poteva provocare la disaggregazione, mentre quella fredda aveva evidentemente effetto contrario.

Siccome il gelo provoca un aumento fino al 5% del volume dell'acqua d'impasto, in caso di forti abbassamenti di temperatura si può avere lo sgretolamento della malta; per questa ragione quando c'era rischio di gelate notturne le murature venivano protette con paglia. La malta idraulica correva assai meno rischi per la sua proprietà di sospendere la presa col gelo, e di riprenderla col disgelo: questo fatto spiega la grande diffusione della miscela pozzolanica. Ignoriamo se i romani conoscessero l'uso di ritardanti del gelo come avveniva ancora nell'Ottocento in Francia e in Italia (1 kg di soda × 10 litri di acqua).

La brevità dei tempi di costruzione di alcuni edifici citati dalle fonti, se da un lato va sottoposta a esame critico, nel senso che la data di inaugurazione spessissimo non corrispondeva all'opera finita (vi sono molti esempi di quest'uso), dall'altro prova che l'affermazione di Frontino (*De aquaed.*, 123, 2) non va presa alla lettera. Egli dice infatti che non si poteva costruire in muratura se non in autunno e primavera per evitare il gelo e l'eccessivo calore che avrebbero danneggiato le strutture; si tratta evidentemente di precetti teorici tradizionalmente trascurati dai costruttori.

7.3.7. Malte speciali

Nella confezione delle malte giocava molto la finalità d'impiego che condizionava fortemente gli stessi procedimenti; qui si citeranno solo alcuni casi per documentarne la varietà. Sappiamo per esempio che, quando serviva una malta molto raffinata e macerata, essa si pestava a lungo nel mortaio; oppure che poteva essere arricchita con sostanze organiche come la caseina, l'olio, la cenere, o spenta con aceto, vino, vischio, uovo ecc. (cfr. Plinio, *N.H.*, 33, 94 e 159; Favent., 6 e 19).

A questo proposito è fondamentale quanto ci tramanda Plinio (*N.H.*, 36, 181):

> la *maltha* si ricava dalla calce appena fatta; essa va spenta col vino e subito pestata [nel mortaio] con grasso di maiale e fichi come doppio emolliente. Questa sostanza diviene tenacissima e supera in durezza le pietre; quello che va rivestito di malta deve dapprima essere spalmato con olio di oliva [per questo cfr. anche Pallad., *Op. Agr.*, 1, 17, 3].

È evidente che Plinio con il termine *maltha* non intende la malta comune ma uno specifico smalto, un impasto di impiego particolare.

7.3.8. Calcestruzzo (opera a sacco, concreto)

Il termine latino corrispondente è *structura caementicia, opus caementicium*. Il nome deriva dai *caementa*, i frammenti di pietra uniti alla malta a formare un impasto. La sua composizione è descritta da Vitruvio: «*structura ex caementis calce et harena*; *genus pulveris* [pozzolana] *mixtum cum calce et caemento*».

Da solo l'impasto è quasi sempre usato nelle fondazioni (sia in cavo libero che armato), più raramente negli alzati di cisterne (*opus signinum*) o piccoli edifici (per esempio, la cosiddette *Schola Xanthi* nel Foro Romano o la basilica neopitagorica di Porta Maggiore), ma di regola è adoperato come nucleo interno dei muri in abbinamento con tutte le cortine tradizionalmente note, tanto di grande che di piccola pezzatura (dall'opera poligonale, piuttosto rara, al laterizio). Le modalità di confezione erano due: gettando l'impasto premescolato (meno frequente) o allettando a mano i *caementa*, e affogandoli poi nella malta molto liquida. Per le fonti letterarie relative cfr. Lugli (1957, pp. 363 ss.) che chiama calcestruzzo (o calcistruzzo) il composto di soli frammenti di selce e malta idraulica.

Un composto di scheggioni più grandi di quelli del normale cementizio (circa m 0,25 × 0,25 × 0,20) legati da malta terrosa, con calce scarsa e di cattiva qualità impastata con argilla o terra argillosa si trova, anche se abbastanza raramente per la sua scarsa resistenza al tempo, disseminata un po' su tutto il territorio nazionale. Il Lugli considera questa struttura uno «*pseudo-caementicium* o quasi concreto». Il suo uso non fu legato a una cronologia precisa ma solo a un sistema murario più rozzo, economico e speditivo destinato a murature di scarso impegno. È in fondo la tecnica che si trova nel nucleo della cosiddetta Aiola di Marsia al Foro Romano (cfr. Giuliani, Verduchi, 1987, p. 95).

7.3.9. Cocciopesto

Normalmente nella letteratura archeologica si confonde con l'*opus signinum* che invece è un composto del tutto diverso (cfr. par. 7.3.10). Basterà a convincersene la voce *signinum opus* nella *Enciclopedia Pauly-Wissowa*, dove dichiaratamente i due termini vengono accomunati a identificare lo stesso materiale.

Il cocciopesto è un impasto di calce, sabbia o pozzolana e frantumi di laterizio più o meno grandi, ma comunque omogenei. Aveva caratteristiche idrauliche favorite sia dalla pozzolana (quando c'era) sia dal tritume di laterizio che, mescolato alla calce conferiva alla malta proprietà idrauliche. Da questo derivava anche il suo impiego come strato impermeabilizzante delle strutture. Non sappiamo se nella miscela rientrassero anche sostanze organiche con funzione di induritori (cfr. la *maltha* nel par. 7.3.7). È difficile comunque considerare il cocciopesto tra gli intonaci, anche se fu utilizzato in prevalenza come rivestimento di murature oppure come masso pavimentale. In realtà le sue qualità meccaniche ne fanno quasi un conglomerato.

Proprio per le sue qualità impermeabilizzanti veniva impiegato nei

luoghi umidi (cfr. par. 6.2; o comunque periodicamente soggetti a umidità) e nei rivestimenti delle cisterne, nelle *suspensurae* dei sistemi di riscaldamento in genere, nei rivestimenti delle superfici estradossali delle volte, delle terrazze, in tutti quei posti insomma dove oggi si adopera la guaina bituminosa.

In strati di un certo spessore dimostrava anche una notevole capacità di resistenza a trazione come risulta da alcuni esempi di applicazioni pavimentali. Faccio per tutti il caso della grande cisterna di Atri (per la sola localizzazione, cfr. Azzena, 1987, p. 40). Qui il pavimento di cocciopesto prossimo a uno spessore di m 0,25, fu gettato su un consistente strato di argilla, che, contrattasi nel tempo in conseguenza del disuso dell'edificio come cisterna, ha privato il pavimento dell'originario sostegno. Così la lastra pavimentale è passata da un regime di sollecitazione a compressione a uno a pressoflessione fino a quando, qualche anno fa, non si provvide, con iniezioni di cemento, a ristabilirne il piano di appoggio. Nell'intervallo, che probabilmente fu piuttosto lungo, il pavimento ha retto senza particolari lesioni né insellamenti, per superfici di oltre 12 mq su lunghezze diagonali di m 5,50, mostrando appunto una resistenza a trazione eccezionale per una muratura.

La letteratura antica non fornisce termini univoci per il cocciopesto, anzi ricorre a termini e perifrasi che possono riferirsi anche all'opera laterizia se esaminati fuori contesto: *opus testaceum, testaceum corium, inpensa testacea, pro harenato testa trullissetur et dirigatur* (Varro, *R.R.*, 3, 11, 12; Pallad., *Op. Agr.*, 1, 8; 1, 9; 17, 1 ss.; Colum., *R. R.*, 1, 6, 13; Plinio, *N.H.*, 36, 188; Vitr., 7, 1, 3; 7, 4, 1; 7, 4, 3; Favent., 18; 19; 24).

7.3.10. *Opus signinum*

Si tratta di un conglomerato che nella letteratura archeologica è divenuto impropriamente sinonimo di cocciopesto.

Già Choisy (1909, p. 29) e Jacono (1924, p. 339) avevano segnalato la differenza sostanziale tra i due composti; l'equivoco è dovuto al fatto che l'*opus signinum* è citato dalle fonti antiche quasi sempre in connessione con strutture idrauliche (Vitr., 8, 6, 14; Colum., *R.R.*, 8, 17; 9, 1) oppure a titolo esemplificativo per il sistema di confezione degli intonaci (Vitr., 2, 4, 3) o di pavimenti (Vitr., 5, 11, 4; Plinio, *N.H.*, 35, 165).

In tutti i casi la confusione è stata facilitata dalla grande diffusione del cocciopesto (che, come si è visto, dalle fonti letterarie non è mai indicato con un termine specifico) usato tanto come intonaco quanto come pavimento.

Recentemente (Ginouvès, Martin, 1985, I s.v.) si è di nuovo marcata la distinzione tra *opus signinum* e cocciopesto. Il signino viene considerato una malta (*mortier*) e distinto pertanto dal cocciopesto che è compreso invece tra i calcestruzzi.

A rileggere le fonti sull'*opus signinum* constatiamo:

1. Che nella sua preparazione un ruolo importante lo aveva la "battitura" del materiale miscelato. Questo procedimento veniva spesso racco-

mandato quando si voleva ottenere una migliore qualità e solidità di un composto murario. Vitruvio (2, 4, 3) ne accenna appunto per l'intonaco fatto con sabbia di fiume che diventava più solido «se battuto con l'appianatoia come succede per l'*opus signinum*». Manca qualunque riferimento a un eventuale carattere di intonaco del signino.

2. Che in alcuni casi, nei giardini dei ginnasi, lungo i percorsi all'aperto era consigliabile realizzare delle piazzole pavimentate *ex opere signino* (Vitr., 5, 11, 4). Doveva trattarsi perciò di un pavimento resistente all'azione dell'acqua, del gelo e della vegetazione, nella cui composizione però non si fa cenno al laterizio o suoi derivati.

3. Che le peschiere costruite sul litorale dovevano essere fatte *opere signino* (Colum., *R.R.*, 7, 17), (sempre perché impermeabili o anche perché a contatto con l'acqua?). Qui si vede con chiarezza che non può trattarsi di intonaco, bensì di una struttura.

4. E infine sappiamo come l'*opus signinum* era fatto nello specifico: Vitruvio (8, 6, 14), parlando dell'approvvigionamento idrico, dice:

> Se il posto è solido le vene particolarmente profonde, allora bisogna raccogliere provviste derivando l'acqua dai luoghi alti o dai tetti per mezzo di *opera signina*. Nel fare l'*opus signinum* si procede così: prima di tutto si deve preparare una arena purissima e granulosa, poi i sassi da mescolare devono essere ricavati da una pietra dura [*silex*] e non essere più pesanti di una libbra, poi si deve procurare calce molto forte da mescolare nel truogolo nella proporzione di cinque parti di rena e due di calce. Scavata la trincea di fondazione fino al giusto livello, cioè quello che poi dovrà essere raggiunto, si deve rinforzare il piano con pali di legno ferrati. Battute [con mazzeranghe] le pareti, occorre svuotare il terreno all'interno fino a raggiungere il piano inferiore delle pareti e, livellata la superficie, la si deve rinforzare per lo spessore progettato.

Praticamente lo stesso brano, senza però la citazione esplicita dell'*opus signinum* è ripreso in Plinio (*N.H.*, 35, 173; cfr. anche Favent., 4 e Pallad., *De Agr.*, 17, 1). Un uso analogo è attestato da Columella (*R. R.*, 9, 1) per le vasche destinate alla raccolta dell'acqua piovana per l'allevamento del bestiame selvatico: «si scavano delle vasche e si pavimentano in signino perché trattengano l'acqua piovana» (cfr. anche Frontin., *De aquaed.*, 10, 5 per l'incile dell'Acqua Virgo).

Riassumendo, gli ingredienti dell'*opus signinum* sono: calce molto forte, arena granulosa e pura, e pietrame duro di piccola pezzatura e la sua preparazione prevede miscela di 5 parti in volume di sabbia e 2 di calce; disposizione del calcestruzzo nella trincea (non si capisce se in gettata o in allettamento a mano) e la costipazione per battitura con mazzeranga.

Dunque l'impermeabilità era dovuta alla "battitura" che conferiva all'impasto una compattezza elevatissima; e le strutture, sia che fossero normali cisterne sia che fossero piscine e vasche costruite sul litorale, dovevano essere per forza realizzate all'asciutto, evidentemente col sistema di armature impermeabili descritto da Vitruvio per le fondazioni in condizioni analoghe (cfr. par. 5.3). Un'impermeabilizzazione ulteriore – ma non sempre necessaria – poteva semmai essere affidata ai rivestimen-

TABELLA 7.3
Tabella dei pesi di alcuni materiali e tipi di muratura con malte

Materiale	*Stato*	*Peso in kg x mc*
Calce in pasta	grassello	1.350/1.450
Malta di calce da muro	comune	1.650/1.750
Mattoni comuni	asciutti	2.500/2.700
Mattoni comuni	bagnati	2.850/3.000
Muratura omogenea di mattoni comuni e malta	pieni asciutta	1.750/1.850
Muratura di pietrame	asciutta	2.000/2.250
Calce viva forte	a zolle	1.300/1.500
Calce viva grassa	a zolle	1.500/1.700
Calce viva macinata	in polvere	1.300/1.500
Gesso cotto macinato	in polvere	1.100/1.250

TABELLA 7.4
Esperienze del Rondelet (Leger, 1875, p. 83) sulla resistenza di alcune armature antiche

Materiale	*Peso specifico*	*kg x cmc*
Intonaco di malta pozzolanica di una cisterna a Roma	1.549	76,1
Intonaco di malta pozzolanica di una cisterna a Lione	2.028	78,2
Malta di un muro a Roma	1.414	70,8
Malta anfiteatro di Frejus	1.644	61,5
Malta del Pont du Gard	1.500	50,2
Malta anfiteatro di Lione	1.269	41,4

ti di cocciopesto. È chiaro che la ricetta vitruviana si modificasse in tempi e luoghi differenti per accogliere la pozzolana e, qualche volta, il tufo.

Il solo accenno alla presenza di frammenti di laterizio nell'*opus signinum* si ha in Plinio (*N.H.*, 35, 165). Ed è proprio da questo che si è originata l'attuale confusione nella letteratura archeologica: è inutile rilevare che la descrizione di Vitruvio (del resto seguito in altro luogo dallo stesso Plinio) rimane quella più affidabile nello specifico. La citazione pliniana può essere dovuta sia a un errore banale, sia allo scambio, del resto ripetuto dai moderni, tra cocciopesto e signino; meno plausibile appare una dilatazione del significato del termine già attivata all'epoca di Plinio.

7.4. Osservazioni sulle murature

Negli studi di archeologia la lunga abitudine a catalogare le cose su base formalistica ha determinato una campionatura ormai consolidata di "tecniche" edilizie ordinata per specie (per esempio, opera poligonale) e sottospecie (di I, II, III e IV maniera) senza alcun riferimento all'artico-

lazione strutturale, e alle peculiarità costruttive delle singole tecniche. In questo, bisogna dirlo, si è stati spinti anche dalle fonti antiche che per quel poco che ci parlano delle strutture murarie lo fanno per lo più con questa stessa ottica.

Per Vitruvio (2, 8, 1-2):

i tipi di muratura sono il reticolato, che ora tutti usano, e quello antico che ha il nome di "incerto". Il più bello è quello reticolato anche se va soggetto a lesioni per via dei *cubilia* allineati, e quindi scollegati da ogni lato [fig. 7.6 dis. 4], mentre, siccome gli scapoli dell'opera incerta sono sovrapposti quasi come embrici, interrompono i giunti verticali e, pur non conferendo alla muratura particolare bellezza, offrono tuttavia maggiore solidità che non l'opera reticolata. È necessario che entrambe siano confezionate con pietre molto piccole così che i muri, densamente saturati con la malta di calce e arena, durino a lungo.

Quando poi le pietre sono porose e poco compatte assorbono acqua dalla malta ma, se la qualità di questa è abbondante, la muratura, disponendo di maggiore umidità, non diventerà subito disomogenea, ma resterà a lungo compatta. Infatti quando la forza della malta sarà stata assorbita dalla porosità delle pietre la calce si staccherà dalla rena disgregandosi e così il pietrame verrà liberato e i muri, col tempo, andranno in rovina. Questo fenomeno lo osserviamo in molte tombe nei dintorni di Roma costruite in cortina di blocchi di marmo o pietre squadrate e con nucleo interno in gettata di calcestruzzo. Col tempo la malta, prosciugata dalla porosità della pietre, deperisce ed esce fuori dai giunti allentati dei blocchi e, quando i legamenti tra le pietre sono dissolti, le tombe crollano.

Chi non voglia andare incontro a questi inconvenienti deve lasciare un vuoto nel mezzo delimitato da muri spessi due piedi fatti di blocchi di tufo, di laterizio o di pietra posti in strati adeguati, e deve ammorsare ad essi, per mezzo di grappe di ferro impiombate, i rivestimenti. Così, realizzata con ordine e non messa insieme alla meglio, la struttura potrà durare per sempre senza difetti perché i sassi e le loro connessure, allettati tra loro e collegati con i giunti, non espelleranno il rivestimento di blocchi né gli ortostati, uniti insieme, andranno soggetti a dissesti [fig. 7.6 dis. 5].

E così non si deve disprezzare il sistema dei Greci, perché non adoperano la struttura rivestita di pietre tenere levigate, ma, quando non ricorrono all'opera quadrata, usano normalmente silice o pietra dura a strati alterni e, come si fa coi mattoni crudi, legano i giunti con assise alternate ottenendo una saldezza duratura. Queste strutture sono di due specie: *isodoma* e *pseudoisodoma*. La prima ha le assise tutte dello stesso spessore, la seconda impari e diseguale. Entrambe, però, sono solide, prima di tutto perché gli scapoli, compatti e resistenti, non possono assorbire acqua dalla malta ma ne conservano a lungo l'umidità, e poi perché, con la loro posizione equilibrata e in piano, non permettono alla malta di scivolare via, anzi, facendo un blocco unico della larghezza del muro, la tengono insieme per sempre.

Un altro tipo di muratura è quello che chiamano *émplecton*, usato anche anche nelle nostre campagne; in esso si rifiniscono le due fronti e per il resto si adoperano sassi grezzi disposti a giunti alterni e legati con malta. Ma i nostri, desiderosi di fare in fretta, costruiscono due cortine ed in mezzo gettano l'impasto di sassi spezzati confezionato a parte. Con questo sistema si vengono a creare tre lastre differenti: le due fronti ed il riempimento interno. I Greci non fanno così, ma, allettando le pietre in orizzontale ed alternandole di testa e di taglio, non riempiono la parte mediana alla rinfusa, ma consolidano l'intera larghezza dei muri tra le due facce. Inoltre inseriscono, ad intervalli, speciali pietre che vanno da fronte a fronte per l'intero spessore della struttura, le quali, come un

robusto legamento, consolidano il muro. [Per questo cfr. anche Plinio, *N.H.*, 36, 171].

Vitruvio continua:

Così, chi vuole scegliere il genere di muratura sulla base di queste considerazioni può orientarsi tenendo conto della durata. Infatti i muri di pietra tenera, con rivestimenti raffinati, si rovinano col passare del tempo. E succede che, quando si debbono stimare per l'acquisto pareti in comune, non si valutano come se fossero appena fatte, ma, desunti dai registri i prezzi d'appalto, si toglie l'ottantesima parte per ogni anno trascorso; la parte restante viene divisa tra i due proprietari.

Qui si ammette chiaramente che tali strutture non possono durare più di ottant'anni.

Per i muri in mattoni crudi invece non si applica alcuna deduzione, ma, purché siano a piombo, sono sempre valutati al prezzo di costruzione.

Più avanti (2, 8, 17) ancora a proposito delle murature dice:

Le leggi non consentono, per i muri da costruirsi su suolo pubblico, uno spessore che superi 1,5 piedi [m 0,45 circa]; così anche le pareti intermedie si impostano dello stesso spessore per non ridurre la luce dei vani. Invece i muri in mattoni crudi, a meno di non essere di due o tre ricorsi, non possono, con lo spessore di un piede e mezzo, reggere il peso di più di un solaio. Ma per la maestà di Roma ed il numero degli abitanti, c'è bisogno di sviluppare molte abitazioni, e siccome non basterebbero le aree per una estensione in piano, bisogna per forza di cose ricorrere allo sviluppo in altezza degli edifici. Per questo si sale con pilastrate di pietra, murature di laterizi e pareti di calcestruzzo, e si sovrappongono per mezzo di spesse travature, ben connesse tra loro, i piani superiori, con gran vantaggio e bella vista. Così, moltiplicate in alto le mura con solai differenti, i Romani hanno belle abitazioni in grande abbondanza. Ecco perché a Roma, per mancanza di aree, i muri non possono essere di mattoni crudi mentre possono esserlo fuori di città.

Il testo di Vitruvio, redatto verosimilmente tra il 35 e il 28 a.C., riporta concetti consolidati (e forse anche un po' "reazionari") nella cultura del suo tempo, mostrando anche notevoli conoscenze circa il comportamento interno delle murature sottoposte a sollecitazioni.

Egli afferma pure che la muratura fatta con sassi molto piccoli, grande quantità di malta e confezionata in modo da avere una presa graduata nel tempo, risultava più solida (2, 8, 2-4). È bisogna dire che a osservare i calcestruzzi contemporanei e più tardi di lui non c'è dubbio che questo sia stato il sistema più diffuso. Il che contrasta con quanto osservato da studiosi moderni sul comportamento delle malte (cfr. par. 7.5.2); sembra infatti che la malta impastata con poca acqua, disposta in letti sottili e compressi e che abbia avuto un tiro più rapido, raggiunga una maggiore resistenza alla compressione, superiore a quella di un provino della stessa malta non messa in opera.

Forse, però, fu l'altissima qualità dei materiali di partenza, oltre che la cura delle singole operazioni nel confezionamento, che consentì ai ro-

mani i risultati noti, attraverso una stagionatura complessivamente più graduale.

Vitruvio, lo abbiamo visto, dopo aver parlato a lungo dei precetti per ottenere murature in grado di durare per sempre («*opus poterit esse sine vitio sempiternum*»), sostiene, legge alla mano, che le murature non possono durare più di 80 anni (2, 8, 8). Non è facile dire se la definizione di questo arco di tempo, così breve, sia dovuta a una "media" stabilita anche sulla base dei fallimenti che certo furono numerosi (e che pertanto l'autore si riferisca alla normale opera cementizia come la intendiamo noi) oppure se, semplicemente, si sia riferito ad altro. Non possiamo escludere infatti che egli pensi all'*émplecton* usato in ambiente rurale (2, 8, 7), quello, per intendersi, delle tre lastre, che certo non poteva durare a lungo. Verso questa interpretazione spingerebbe anche il confronto che egli fa tra questa struttura e quella in mattoni crudi, anch'essa usata in ambiente rurale. A meno che non riporti solo vecchie idee suffragate da leggi ancora in vigore al suo tempo ma che di fatto non corrispondevano più alle caratteristiche di durata delle murature.

Nell'inquadrare le diverse tecniche murarie qui si farà riferimento più alle caratteristiche strutturali che a quelle formali (per queste, cfr. Blake, 1947, 1949, 1973; Lugli, 1957). Per *muratura ordinaria* si intende la normale struttura il pietrame e legante di malta di calce in cui la cortina costituisca un tutto organico con il nucleo, cioè sia con esso intimamente connessa. Per questo si sono escluse le murature in opera poligonale e quadrate anche in quei casi in cui rivestono un nucleo in concreto. Nei raggruppamenti si tiene conto delle caratteristiche del pietrame di cortina indipendentemente dalla successione cronologica.

7.4.1. Muratura ordinaria di pietrame naturale a pezzatura irregolare

In questa classe rientrano l'*opera cementizia* pura e semplice, quella *incerta*, quella *a ciottoli* e la muratura in cui la cortina è composta dello stesso pietrame del nucleo, ma scelto e allettato con maggior cura (vedi, per esempio, molte sostruzioni dell'area settentrionale della Villa Adriana).

Il materiale era quello generalmente reperibile sul posto, anche di qualità e tipo vari (per esempio, ad Alba Fucente si ha arenaria e calcare compatto in costruzioni dello stesso tipo e della stessa epoca, così, lungo le fasce subappenniniche laziali, dove convivono tufi, calcari terziari, puddinghe, tartari, travertini ecc., si trovano impiegati indifferentemente tutti questi materiali).

La forma degli scapoli dipendeva dalla frantumazione naturale o dalla conformazione del banco di estrazione: si andava così da quelli prismatici a spigoli vivi, fortemente irregolari, erratici o derivati dalla spezzatura con il maglio, a quelli con le facce di giacitura parallele derivanti dai calcari con stratificazione a libro. Ovviamente con tutti i passaggi intermedi.

È naturale che il reticolo esterno della cortina muraria fosse determi-

nato dalla forma del materiale usato, così è possibile trovare, accanto all'opera incerta canonica, strutture considerate "quasi reticolate" o addirittura con tendenza alla "spinapesce" variamente orientata. Queste diverse forme non hanno quasi mai, come è intuibile, valore cronologico: si tratta semplicemente di esiti grafici di superficie obbligati appunto dalla specie del materiale.

Tuttavia, proprio per la differente forma e pezzatura degli scapoli, durante la costruzione si dovevano prendere dei provvedimenti. Nel caso dell'opera incerta canonica, per esempio, bisognava realizzare frequenti *spianamenti orizzontali.*

La muratura ordinaria di ciottoli è diffusissima, basta pensare alle città dell'Italia padana. In genere i ciottoli venivano spezzati per avere almeno una faccia ruvida, quindi più adatta alla presa con la malta legante. I vuoti fra i vari elementi erano riempiti con allettamenti di scaglie.

La forma sfuggente degli scapoli non dava molto affidamento e sopportava malamente le spinte laterali, anche quando il muro era costruito con grande cura. Per questo erano necessari frequenti spianamenti per ripartire i carichi sull'intera sezione della struttura e, già in età augustea, si riscontra l'uso di efficienti cinture orizzontali di laterizio.

Il volume delle pietre da cortina per queste murature variava di molto; le dimensioni usate in antico erano comprese tra la grandezza di un pugno e quella di una testa, il che consentiva di ridurre al minimo le schegge di allettamento.

Anche nell'opera incerta canonica, quella a scapoli prismatici irregolari, erano necessari ritocchi con colpi di martellina per adattarli alla particolare collocazione. Del resto abbiamo visto (cfr. par. 7.1) che i romani davano un notevole peso all'uso di pietrame di dimensioni stabilite. Anche nell'opera incerta si cercava di evitare gli allineamenti sulle verticali, per scongiurare lesioni.

Le pietre dovevano essere ben pulite, prive di scorie terrose e, quando possibile, bagnate a lungo prima della messa in opera per il fatto, più volte accennato, che se il pietrame era asciutto durante il tiro "bruciava" la malta annullandone o riducendone sensibilmente il potere legante.

In genere durante la costruzione era conveniente procedere mantenendo la stessa altezza per l'intera estensione della fabbrica, così da avere un assestamento uniforme: questo però nel caso di organismi troppo estesi poteva non essere possibile. Allora si procedeva con tratte a stato di avanzamento differenti. All'estremità del muro finito si lasciava una ammorsatura a dente per un collegamento efficace con la parte da ultimare. In questo senso vanno lette certe ammorsature singole, cioè senza il riscontro simmetrico, che si trovano su alcune strutture e che spesso vengono risolte come "incontri di maestranze".

Ultima osservazione in proposito: se, tra le varie fasi di costruzione dello stesso muro nel senso della lunghezza, era passato troppo tempo, i denti della prima potevano spezzarsi senza opportuni accorgimenti.

7.4.2. Muratura ordinaria di pietrame naturale a pezzatura regolare

A questa classe appartengono le strutture a blocchetti parallelepipedi disposti ad assise orizzontali (cfr. *petit appareil,* opera saracinesca ecc.), la spinapesce verticale, il reticolato.

Per la muratura a blocchetti vale quanto detto per l'opera incerta, compresa l'alternanza dei giunti verticali. Questa tecnica fu in uso già nel II secolo a.C. nei rivestimenti intradossali delle volte (cfr. *Porticus Aemilia*).

La spinapesce verticale di blocchetti squadrati è molto rara, ma si riscontra qualche volta (Strada di Pomata a Tivoli).

L'uso di pietrame regolare per le cortine si comincia a diffondere, prima come blocchetti parallelepipedi e subito dopo come *cubilia* dell'opera reticolata, già nel II secolo a.C.

L'opera reticolata è costituita da piccoli elementi a forma di piramide tronca di materiali diversi. Data la dipendenza dalla forte organizzazione industriale, si era meno legati alla produzione locale di quanto non avvenisse, per esempio, per l'opera incerta. Si hanno prove infatti di trasporti, anche se non frequentissimi, da aree più o meno lontane dai cantieri (basteranno gli esempi dei *cubilia* di tufo flegreo nella Villa di Tiberio a Capri, o di "cruma" campana sul Palatino a Roma).

Non è facile sapere se il materiale venisse lavorato in cava oppure direttamente nel cantiere di impiego così da ottenere anche il pietrame per i conglomerati. Verso questa seconda ipotesi spingerebbe la frequente identità del materiale nelle cortine e nei nuclei. D'altra parte, per fare i *cubilia* in modo che il rapporto tempo/produzione fosse vantaggioso, occorrevano maestranze pratiche e specializzate, immaginabili più facilmente nella cava che non disseminate in ogni cantiere. Magari si sceglieva la cava più vicina al cantiere.

Ci sarebbe forse da fare anche una distinzione tra classi di impresa piccole, di poco impegno, e quelle di grande impegno. Per le prime, forse, la sola incidenza del trasporto avrebbe reso antieconomico il lavoro, per le altre la vastità dell'opera poteva assorbire vantaggiosamente l'onere maggiore. Poteva anche darsi che le grandi opere, pubbliche o private, prevedessero il trasferimento temporaneo di maestranze specializzate sul luogo del cantiere o nelle immediate vicinanze così da sfruttare i materiali locali.

Valga per tutti il grande sistema di cave individuato recentemente ad Alba Fucens da F. Piccarreta e quello della Villa Adriana (Giuliani, 1988).

I sistemi di ammorsatura, le piattabande e gli archi restarono naturalmente quelli comuni anche alla classe di murature precedente: i blocchetti parallelepipedi, o a cuneo, della stessa pietra, i laterizi, o la loro alternanza (soprattutto in Campania) nello schema dell'opera detta "vittata".

I vantaggi del reticolato furono soprattutto nella standardizzazione del materiale che rendeva più fluido il lavoro di tessitura delle cortine, eliminando o nascondendo molto bene i giunti di cantiere. Non va di-

menticata poi la possibilità da parte degli appaltatori (*redemptores*) di approvvigionarsi in sedi distinte. La regolarità delle componenti rendeva agevole la tessitura della cortina e quando, per un gruppo di tessere di dimensioni anomale, capitava che si "spettinasse" un tratto di muratura, il rimedio era semplice. Bastava mettere in opera alcuni elementi tagliati lungo la diagonale della base per ristabilire un'orizzontale al di sopra della quale si riprendeva con il numero di tessere necessario a riguadagnare il ritmo.

La minore fiducia che Vitruvio nutriva per questa opera rispetto a quella incerta, era giustificata e trovava riscontro anche nella consistenza delle sezioni interne delle due strutture. Si può facilmente constatare che nell'opera reticolata, rispetto all'altra, si ha un aumento della quantità di malta a mano a mano che si penetra nel nucleo. Questo fatto, consentendo una maggiore compressibilità della sezione interna rispetto alla cortina, determinava, come s'è visto, più elevate possibilità di distacco.

Vi sono anche diversi esempi di *opera reticolata policroma*, composta cioè di differenti materiali (per esempio, tufo e calcare, tufo e cruma ecc.) che, combinati in vario modo, davano luogo a disegni e simboli.

Quest'uso non sembra avere una motivazione univoca. Oltre quella ovvia della decorazione di pareti prive di intonaco, c'è quella, che sembra del tutto casuale, di disegni sconnessi e incompleti fatti in cortine che dovevano essere intonacate (sembra trattarsi di semplici "giochi" di maestranze che tendevano a spezzare così la monotonia del lavoro). Si deve poi pensare a una motivazione strutturale quando la parete, intonacata, era eseguita con quantità pari di materiali differenti (l'esempio tipico è il cosiddetto *Capitolium* di Terracina). Dovendo esaurire scorte di pietrame diverso che reagiva in modo disomogeneo col nucleo interno, si cercava di frammentare al massimo l'eventuale confluenza di sollecitazione.

Questa alternanza continua e diffusa era necessaria solo per le strutture fatte in uno stesso arco di tempo; il discorso non avrebbe senso per fasi strutturali distanziate in cui la prima muratura avesse già tirato.

7.4.3. Muratura ordinaria di pietrame artificiale

In questa classe rientrano le strutture in mattoni cotti, e quelle di pezzame di tegole da tetto (tegolozza). Per l'opera laterizia cfr. par. 7.2.2.

7.4.4. Murature ordinarie con cinture

Un'esigenza primaria di ogni costruzione fu sempre quella di procedere per piani orizzontali, mantenendo la maggiore omogeneità di struttura, assicurando il legamento tra le cortine e il nucleo. L'accorgimento più semplice fu quello delle "stasi di muratura": durante la costruzione a intervalli regolari ci si fermava per consentire il tiro, in modo che il successivo carico non sfiancasse il muro; in questo modo inoltre si verifica-

va l'orizzontalità, e si livellavano i piani per ripartire il più possibile i carichi sull'intera superficie.

In seguito le stasi di muratura coincisero con le *cinture*; sempre a intervalli più o meno regolari, con le variazioni degli spiccati, si inserirono, almeno a partire dal I secolo d.C. (cfr. Villa di Tiberio a Capri), fasce orizzontali di cinque o più laterizi tagliati a triangolo a delimitare specchiature di opera incerta o, più spesso, reticolata. Queste cinture che compaiono anche in connessione con la struttura di ciottoli ebbero lo scopo principale di facilitare la coesione tra le cortine e il nucleo, e di permettere un controllo costante dell'orizzontalità delle murature. Sempre nel I secolo a.C., sembra sotto Domiziano, si diffuse la tecnica di inserire nella muratura laterizia *ricorsi di bipedali*. Questi, che venivano messi in opera interi, assolvevano, oltre alle funzioni suaccennate, anche a quella di incatenare le cortine al nucleo e di ripartire i carichi con maggiore efficacia. Che questi ricorsi avessero una funzione di riferimento nel cantiere è provato anche dal fatto, ancora riscontrabile con grande frequenza a Ostia, che venivano sottolineati con vernice rossa (Taberna dell'invidioso, Caserma dei Vigili ecc.).

L'uso fu molto frequente nelle costruzioni di buona epoca; in età tarda però, con l'uso di bipedali molto sottili rispetto a quelli di I e II secolo, si diffonde l'impiego di "fette" di bipedali, cioè di porzioni longitudinali pari a 1/2 o 1/3 di bipedale. Certamente questo si faceva per risparmiare, ma siccome veniva a diminuire fortemente la funzione della ripartizione dei carichi, c'è da chiedersi se questo sistema non rispecchi un inganno dell'imprenditore nei confronti del committente, un po' come le cornici "alla traditora" usate per le finestre nelle costruzioni barocche.

Riassumendo, queste "cinture", intese come fasce di più ricorsi di laterizi, che troviamo in connessione con le opere incerta, a ciottoli, a blocchetti, reticolata, danno luogo di fatto a un'opera mista, anche se per *opus mixtum*, per eccellenza si intende quello di laterizio e reticolato. I ricorsi di bipedali invece, completi o a fette, si trovano solo nell'opera laterizia.

7.4.5. Muratura ordinaria di pietrame naturale e artificiale a pezzatura varia

Si tratta delle cortine composte di assise di blocchetti, per lo più di tufo, alternati a liste di uno o più assise di laterizio. Il numero e l'alternanza dei ricorsi dei differenti materiali variano con grande frequenza.

Questa tecnica venne usata già nella prima metà del II secolo d.C. in strutture perfette dal punto di vista tecnico, di grande impegno statico, ed eseguite con materiale di prima mano (basta pensare alla Rocca Bruna di Villa Adriana), tuttavia si intensificò, fino a generalizzarsi, in età tarda. Questo perché si prestava al reimpiego del pietrame derivato dalle demolizioni. Così, accanto ai blocchetti, compaiono frequentemente serie di *cubilia* di reticolato, fuori contesto, allettati con un lato di base in orizzontale, tegole con le alette ecc.

7.4.6. Muratura ordinaria di pietrame naturale e artificiale a pilastri resistenti

Si tratta delle strutture che descrive Vitruvio (cfr. par. 7.4) già per la fine della repubblica e che si trovano ancora per tutto l'impero. Esse erano formate da pilastri di blocchi di pietra collocati nei punti di maggiore sollecitazione della struttura, e da tamponature di muratura a pietrame minuto negli intervalli. In questa categoria facciamo rientrare anche le murature in opera mista con pile di laterizio o vittato particolarmente curate e ammorsate alle cortine laterali. Si tratta di ossature più adatte a resistere allo schiacciamento di quanto non lo sia il resto della parete, e quasi sempre coincidono con i punti di particolare impegno strutturale.

7.4.7. Muratura a secco

In questa categoria rientrano l'opera poligonale (delle diverse maniere) e quella quadrata purché adoperate in assenza di conglomerato.

Per quanto riguarda la prima è stato dimostrato in più occasioni – e da vari autori – l'inconsistenza del rapporto: I maniera = maggiore antichità / IV maniera = minore antichità; tuttavia resta la tendenza, inconsapevole o strumentale, a resuscitare questa sensazione o almeno a suggerirla al lettore.

Forse vale qui la pena di riaffermare questo concetto, del resto elementare; per gli esempi di strutture con cortina esterna di III maniera e interna di I, si veda Lugli (1957). Poi bisogna dire che quasi sempre c'è uno stretto legame tra la "maniera" e la qualità del materiale – di solito il calcare – come dimostra la splendida campionatura che si può seguire lungo tutto il circuito murario di Segni. È inoltre difficilmente definibile il limite tra le diverse maniere dipendendo esso, soprattutto, dalla stima soggettiva; così può capitare che studiosi diversi parlino di II o di III maniera per lo stesso monumento.

La resistenza delle strutture realizzate con queste tecniche, soprattutto le poligonali i cui blocchi non erano né ingrappati né imperniati, come invece era frequente nell'opera quadrata, restava affidata prevalentemente alla forza di inerzia, e quindi reggevano male a sollecitazioni costanti che non fossero verticali. Sembra invece che, anche grazie al rapporto altezza/spessore, abbiano retto abbastanza bene ai movimenti sismici. La stabilità dell'opera dipendeva soprattutto dal materiale, che doveva essere il più omogeneo possibile, dalla sapienza della sua messa in opera e dall'inclinazione che si dava al filo esterno. Un muro in tecnica poligonale a secco, a parità di condizioni e materiale, abbisognava di una sezione maggiore di quella di un muro con legante.

Dei sistemi costruttivi, e quindi delle caratteristiche di questi muri, sappiamo praticamente tutto perché si costruiscono ancora oggi con le stesse modalità e funzioni di quelli antichi: basta pensare alla fodera delle scarpate ferroviarie.

L'opera quadrata e quella poligonale le troviamo usate anche in combinazione con il nucleo di calcestruzzo.

7.4.8. Muratura a secco di pietrame artificiale

È quella in mattoni crudi per cui cfr. il paragrafo 7.4. Qui di seguito è data la tabella riassuntiva delle murature con legante:

a) muratura ordinaria di pietrame naturale a pezzatura irregolare:

— cementizia;
— incerta;
— ciottoli;
— pietrame scelto;

b) muratura ordinaria di pietrame naturale a pezzatura regolare:

— blocchetti;
— reticolata;

c) muratura ordinaria di pietrame artificiale:

— mattoni crudi;
— laterizi;
— tegolozza;

d) muratura ordinaria con cintura:

— ciottoli;
— blocchetti;
— incerta;
— reticolata;
— laterizia;

e) muratura ordinaria di pietrame naturale e artificiale a pezzatura varia:

— vittata;

f) muratura ordinaria di pietrame naturale e artificiale a piloni resistenti:

— incerta + pile;
— reticolata + pile;
— laterizia + pile;

g) muratura di pietrame naturale a secco:

— poligonale;
— quadrata;

h) muratura di pietrame artificiale a secco:

— mattoni crudi.

7.5. Richiami sul comportamento delle murature

7.5.1. L'assestamento

Tutte le costruzioni in muratura sono soggette all'assestamento. Assimiliamo il muro a un solido prismatico rettangolare: quando la

costruzione sarà arrivata a una certa altezza il peso proprio la ridurrà per compressione. Questo provocherà oltre all'abbassamento della parte già costruita, anche l'allargamento della sezione mediana. Pensando il fenomeno in movimento, notiamo durante la costruzione l'avvicinamento continuo delle sezioni intermedie, fino a raggiungere l'equilibrio. Questo avvicinamento sarà crescente dalla base verso la sezione mediana orizzontale e decrescente da questa verso quella di coronamento. Le due sole sezioni invariate resteranno appunto quella di base, se il solido poggia su un terreno incompressibile, e quella opposta perché non sollecitata.

Il fenomeno è tanto più sensibile quanto più i materiali adoperati sono teneri, la malta abbondante e acquosa, la costruzione rapida, come appunto era il caso nell'antichità; di questi fattori si doveva tenere gran conto quando si costruiva un muro addosso a uno preesistente, data la facilità di provocare lesioni con distacchi tra le strutture.

Negli edifici a grande sviluppo verticale (torri, fari, piloni di ponti ecc.) si evitava di fare i rinforzi angolari con materiali più resistenti e/o di pezzatura maggiore, secondo il sistema normalmente applicato invece negli edifici ordinari. Questo perché serviva la massima omogeneità, lungo tutto il piano di facciata e in ogni sezione orizzontale, altrimenti l'assestamento differenziato della porzione intermedia rispetto a quelle angolari avrebbe causato lesioni verticali e dissesti anche irreparabili.

Proprio alla sostanziale disomogeneità della struttura si deve il singolare crollo dell'arcata di Ponte Lucano sulla via Tiburtina, avvenuto qualche anno fa. Qui, secondo un sistema non insolito nell'antichità, le arcate di calcestruzzo gettate su centina vennero contenute da ghiere di conci di travertino scarsamente ammorsate al conglomerato. Il differente coefficiente di assestamente tra le ghiere e il nucleo di muratura dovette provocarne la separazione; con il secoli, il primo a cedere fra i tre elementi è stato il nucleo cementizio che è crollato lasciando intatti i due archi di testata.

7.5.2. La malta

Sappiamo che la malta in genere è meno resistente del pietrame; alla fine del secolo scorso il Tourtay (1885, p. 582) dimostrò tuttavia che la malta inserita nella muratura, a presa avvenuta, era assai più resistente alla compressione di quanto non lo fosse quella di un provino isolato. Questa resistenza diminuiva coll'aumentare dello spessore del giunto di malta: il fenomeno dipende dal fatto che uno strato sottile asciuga prima e meglio conferendo maggiore durezza al materiale. Per il comportamento in proposito dei costruttori romani, cfr. par. 7.4.

Dunque la muratura nell'insieme resisteva alla compressione meno della pietra, ma più della malta, dalle quali era composta. Per questo nei punti di carico concentrato si dovevano prendere particolari provvedimenti (cfr. par. 7.2.2).

Data la loro scarsa elasticità le murature raggiungono il carico di rottura senza manifestare deformazioni apprezzabili: in genere la pratica stabilisce il carico di sicurezza a 1/10 di quello di rottura. Gli elementi

che concorrono a definire quest'ultimo sono diversi; tra gli altri l'accuratezza della confezione della struttura, la qualità dei materiali, la loro stagionatura, la scelta, la disposizione ecc. Così, per esempio, a parità di materiali, sarà molto più resistente una costruzione a ricorsi orizzontali piuttosto che quella a reticolo poliedrico.

7.5.3. Resistenza delle murature

RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE

I carichi di sicurezza alla compressione in condizioni ordinarie, per muri di spessore superiore ai m 0,45 (1,5 piedi) si aggirano intorno ai valori elencati in tabella 7.5. Essi sono desunti da quelli per murature di grosso impegno della fine del secolo scorso, e pertanto, seppure per difetto, risultano assimilabili a quelli antichi.

TABELLA 7.5

Muratura di	*kg × cmq*
Tufo con malta di calce	4/5
Mattoni ordinari e pietrame con malta comune	4/5
Calcestruzzo comune	5/6
Mattoni ordinari e malta idraulica	5/6
Mattoni forti e malta idraulica	15
Pietrame sbozzato e malta idraulica	8/10
Conci di pietra e malta idraulica	30/40
Apparecchio in pietra da taglio di calcari teneri	15/20
Apparecchio in pietra da taglio di calcari duri	20/30
In pietra da taglio di granito	40/60

Calcoli fatti dal Leger (1875, p. 132) su murature romane, per lo più di ponti, hanno dato i seguenti risultati (kg × cmq):

Ponte d'Ambrois	5,00
Ponte Elio	5,05
Ponte di Rimini	5,67
Ponte Salario	6,20
Ponte Fabricio	6,66
Ponte di Narni	19,40
Ponte di Salamanca	20,46
Ponte di Alcantara	20,64
Pont du Gard	22,60
Basilica di Massenzio	24,50

Un'oscillazione così elevata non è giustificata dall'uso di materiali diversi: basta pensare che nel Pont du Gard, a parità di pietra impiegata i

piloni del III ordine lavorano a 3,70 kg × cmq, mentre quelli alla base a 22,60. Per le strutture di spessore inferiore a m 0,45 in mattoni e pietrame, la resistenza alla compressione si riduceva di 1/2 o 1/3 dei valori precedenti. Se si trattava di pilastri, però, la riduzione era di 1/2, mentre a 1/3 ammontava quella delle murature di pietrame poroso se bagnate. Per questa ragione, quando il muro era soggetto a umidità (stabile o periodica) non poteva essere molto caricato. E sempre per questo i romani evitavano, quando potevano, nei calcestruzzi per le conserve d'acqua il pietrame poroso, ricorrendo piuttosto a selce, travertino, calcare di monte e simili (cfr. par. 7.3.10).

Praticamente era irrilevante la resistenza alla compressione delle murature legate con argilla, quelle di mattoni crudi, o quelle a secco.

Da tutto questo si desume che lo *schiacciamento*, cioè il dissesto dovuto alla compressione, poteva cominciare anche con una sollecitazione modesta e arrestarsi quando, allargatasi la base di aderenza, si fosse raggiunto l'equilibrio.

RESISTENZA ALLA TRAZIONE

Siccome è notevolmente inferiore alla resistenza a compressione (da 1/7 a 1/20), si pensa che normalmente si cercasse di evitare questa sollecitazione. All'inizio del Novecento, nelle costruzioni ordinarie si ammetteva il lavoro a trazione purché non fosse permanente e comunque mai superiore a 1 kg × cmq. Tuttavia da molti esempi (volte ribassatissime della Villa di Cicerone a Formia, volte intermedie e solette piane nelle taberne del Foro di Cesare, taberne di *insulae* ostiensi e romane, copertura del ninfeo repubblicano nella Villa Adriana, piattabanda nel Santuario di Ercole a Tivoli ecc.) risulta che un certo affidamento alla resistenza a trazione si faceva. Del resto ci sono casi in cui è chiaramente dimostrato che il calcestruzzo antico, per la sua altissima qualità, è in grado di lavorare anche a trazione. L'esempio migliore che mi viene in mente è il tratto di opera mista che copre la grande apertura praticata dal Canina nel muro di spina del Pecile di Villa Adriana. Qui il conglomerato è risultato così solido che l'architetto non ritenne necessario proteggere la nuova luce con travi o piattabanda, preferendo lasciare la scalpellatura al vivo. Il vano esiste ancora e la muratura non mostra lesioni nonostante sia stata colpita da due cannonate durante l'ultima guerra.

RESISTENZA AL TAGLIO VERTICALE

L'assestamento disomogeneo poteva dar luogo a *sforzi a taglio* che tendevano a provocare lesioni specialmente in corrispondenza di eventuali allineamenti di giunti verticali.

Nelle murature con nucleo di conglomerato e cortine di pietrame o laterizio, e letti di malta sottili (la gran parte delle costruzioni romane), la maggiore contrazione del nucleo rispetto alle facce avrebbe potuto provocare il distacco di queste. Così si cercava di ottenere la massima omogeneità della struttura ammorsando le cortine e i nuclei attraverso

le estremità cuspidate degli elementi di superficie (*cubilia*, laterizi ecc.). Bisogna notare che la disposizione alternata degli scapoli e dei laterizi, come pure la scabrosità delle facce interne smartellinate, favoriva l'efficacia dell'ammorsatura. A questo scopo concorreva anche la disposizione delle pietre del nucleo che si incastravano tra i vuoti delle cuspidi del materiale di cortina omogeneizzando al meglio la struttura (fig. 7.1 dis. 4).

Quando i muri erano molto alti e le cortine non interrotte da cinture (cfr. par. 7.4.4), poteva succedere che per l'assestamento si troncassero le code degli elementi di cortina con distacchi anche vasti, della superficie in vista.

Nelle ammorsature vere e proprie, quelle poste ai terminali delle pareti o nelle spalle delle aperture, era fondamentale che durante la costruzione si lasciasse, *sopra il dente dell'ammorsatura*, un letto di malta più spesso. Questo per consentire al nucleo di schiacciarsi durante la presa senza spezzare il dente dell'ammorsatura vanificandone la funzione. Lo sforzo a taglio poteva avere anche andamento orizzontale o obliquo, ed era in questo caso favorito dalla fluidità dei letti di malta quando ancora fossero stati freschi. Questo poteva succedere nelle sostruzioni contro terra, nelle spalle dei ponti sottoposte alle spinte oblique degli archi ecc. In queste condizioni, si impiegavano materiali di grande pezzatura, capaci di concorrere anche con la loro inerzia alla spinta e si applicavano gli incatenamenti con grappe orizzontali e perni verticali (cfr. strutture relative ai piloni dei ponti ecc.)

7.6. Legnami da costruzione

Il legname usato nell'edilizia si divide da sempre in due grosse categorie: *legno dolce* (o *tenero*) e *legno forte*.

Legni dolci | Sono quelli a fibra tenera, più o meno allungata, di facile lavorabilità e messa in opera; non sono di grande resistenza e tenacia (pino, abete, pioppo ecc.). Nella pratica si associano anche essenze, come il faggio, l'olmo, il frassino, che apparterrebbero piuttosto all'altra categoria, quella dei legni forti, ma che, siccome hanno una fibra meno densa e soprattutto corta e discontinua, finiscono per essere adoperati per gli stessi usi dei legnami dolci. In antico, se ne facevano per lo più tavole, elementi per ponteggi e armature, piccole centine, serramenti ordinari per interni.

Legni forti | Sono quelli a fibra densa e compatta, quindi molto duri e tenaci e perciò difficili da lavorarsi, ma di grande resistenza (quercia-rovere, cerro, ischio, leccio, larice, castagno selvatico, noce chiaro e scuro, olivastro, olivo domestico ecc.). Naturalmente in età romana non tutti si prestavano agli stessi usi, per esempio l'olivo domestico o la quercia cresciuta in terreno roccioso a causa delle fibre contorte e del gran numero di nodi risultavano instabili anche dopo lunga stagionatura. Così il pino, pur essendo un legno dolce, per la lunghezza delle fibre e la relative scarsità dei nodi era usato anche nelle travature di un certo impegno,

TABELLA 7.6
Tabella esemplificativa dei pesi di alcuni legnami

Legname	*Stato*	*Peso in kg × m*
Abete	stagionato	450/570
Acacia	stagionato	700/750
Acero	stagionato	570/750
Castagno selvatico	stagionato	680/750
Faggio	stagionato	720/850
Larice nostrano	stagionato	530/650
Frassino	stagionato	720/800
Noce chiaro	stagionato	550/750
Noce scuro	stagionato	700/800
Ontano	stagionato	550/700
Pioppo	stagionato	450/530
Quercia (rovere)	stagionato	780/950
Olmo	stagionato	680/730

mentre si cercava di evitare il frassino troppo soggetto alla tarlatura. I criteri nella scelta del legname erano: la resistenza ai carichi, la possibilità di ottenere pezzature adeguate e, subito dopo, la resistenza all'aria, all'acqua e ai tarli. Talvolta queste ultime caratteristiche facevano superare anche deficienze nelle qualità meccaniche (cfr. tab. 7.6).

In genere il larice, il castagno selvatico e il noce nostrano erano adoperati nelle coperture per la grossa orditura. Tra le querce quella più usata era il rovere (*quercus robur*), tuttavia di difficile lavorazione e grande peso. Altre essenze erano adoperate per usi speciali: l'acacia, per la costruzione di parti di carro e la difesa delle rive dei fossi; l'ontano per le palafitte e le fondazioni subacquee.

Il legname destinato al cantiere era tratto da piante vive abbattute nella stagione e con la luna adatte, e poi lasciato stagionare; escluso, naturalmente, quello destinato a restare a contatto con l'acqua.

Siccome il legname subisce forti dilatazioni per l'umidità (in qualche caso quella lungo le fibre è doppia di quella a traverso) nelle operazioni di cantiere bisognava tenerne conto soprattutto quando si aveva bisogno di un alto grado di indeformabilità come, per esempio, nel caso delle centine.

Vitruvio (2, 9, 5 ss.) tratta delle qualità di alcuni legnami che, proprio per avere caratteristiche fortemente dissimili, come quercia, olmo, pioppo, cipresso, abete ecc., risultavano utilissime nell'edilizia.

Dell'abete dice che, usato nei solai, resisteva alla flessione da carico (2, 9, 6); della quercia che diventava durissima nelle fondazioni ma che, a contatto con l'acqua, si torceva fessurandosi (2, 9, 8), così come l'ischio (altro tipo di quercia); del cerro e del faggio afferma che marcivano con facilità (2, 9, 9); del pioppo (tanto quello chiaro che quello scuro) del salice e del tiglio vanta la resistenza all'uso (2, 9, 10); dell'ontano dice che, conficcato in terreno palustre, diventava praticamente eterno ed era capace di sostenere grandi carichi di muratura, mentre, posto all'aria, durava poco. Quest'ultimo fu usatissimo nelle fondazioni di edi-

fici sia di piccolo sia di grande impegno statico (per Ravenna, cfr. Vitr., 2, 9, 10). Vitruvio apprezza i pregi anche dell'olmo e del frassino (2, 9, 11), mentre resta indeciso se esaltare di più il cipresso o il pino, ma anche il cedro e il ginepro per la resistenza ai tarli (2, 9, 12-13).

Un discorso a parte fa per il larice, noto ai suoi tempi nella zona padana e sulle coste adriatiche, apprezzatissimo non solo per la resistenza ai tarli ma soprattutto perché ignifugo. Egli si rammarica che non fosse importato a Roma perché sarebbe stato utilissimo, almeno nei sottogronda lungo il perimetro dei palazzi, per evitare il diffondersi degli incendi (2, 9, 14). L'importazione del larice iniziò subito dopo: Plinio (*N.H.*, 16, 200) la attesta, infatti, sotto Tiberio.

Per un esame abbastanza completo delle fonti letterarie ed epigrafiche riguardanti il legname da costruzione è di grande utilità l'Orlandos (1966, I, pp. 1 ss.).

Riguardo alle dimensioni delle travi adoperate nell'architettura romana, Plinio (*N.H.*, 16, 200) sostiene che l'albero maggiore esistito fino ai suoi tempi fu quello trasferito a Roma sotto Tiberio insieme ad altro legname e che per le sue straordinarie dimensioni venne lasciato in vista nella naumachia in Campo Marzio fino a quando Nerone non lo adoperò per costruire il suo anfiteatro ligneo (cfr. Suet., *Nero*, 12). Era una trave di larice lunga 120 piedi (= m 35 circa), con uno spessore uniforme di due piedi (= m 0,60 × 0,60 circa). Queste dimensioni rendevano quasi incredibili le dimensioni dell'albero da cui era stata tratta la trave.

Sempre Plinio (*N.H.*, 16, 201) ricorda un'altra trave, avanzata dal legname adoperato per la costruzione del tetto del *Diribitorium* che Agrippa fece esporre all'ammirazione della gente nei portici dei Saepta: era lunga 100 piedi (= m 30 circa) e aveva una sezione di un piede e mezzo (= m 0,45 × 0,45 circa).

Lo stesso autore ricorda con stupore l'albero, tratto da un abete, per l'imbarcazione costruita per il trasporto dell'obelisco del Circo di Caligola, e quelle dell'albero della nave di Demetrio Poliorcete alto 130 piedi.

8

Il cantiere

L'organizzazione del cantiere è fondamentale per la buona riuscita dell'attività edilizia. Da tempo si sostiene, ed è generalmente accettato, che il calcestruzzo si diffuse per la maggiore economicità rispetto all'opera quadrata per il fatto che per prepararlo serviva mano d'opera non specializzata; a mio parere si dovrebbe sempre specificare di quale tipo di costruzione si tratta, per non rischiare di ricadere in uno dei tanti stereotipi che circolano nella cultura archeologica. Nessuno può seriamente pensare che per costruire volte massive non occorresse specializzazione, o non ne servisse per tessere piattabande di grande luce, oppure per tutti gli interventi di consolidamento che ancora notiamo nelle antiche ossature murarie.

La tecnica edilizia basata sull'uso del calcestruzzo e delle pietre artificiali doveva essere sostenuta da una organizzazione assai complessa, senza la quale sarebbe entrata in collasso e ridotta a vita stentata. E non è il caso dell'architettura romana.

Riguardo la specializzazione necessaria alla costruzione in opera quadrata si ricorda la notizia curiosa di Diodoro Siculo (16, 18, 2-8) a proposito della costruzione delle mura di Siracusa. Dionisio il Vecchio alla fine del V secolo a.C. precettò 60.000 contadini e li distribuì tra le cave e i vari cantieri riuscendo a costruire in 20 giorni 4,5 km di mura sulla collina di Epipole (cfr. Garlan, 1974). Anche facendo la dovuta tara alle cifre, e tenendo conto che l'episodio è riportato come cosa straordinaria, rimane comunque difficile sostenere, a uguale classe di costruzione, che fra le due tecniche vi fosse una forte differenza di specializzazione.

Probabilmente la verità è come sempre nel mezzo: a parità di qualità entrambe le tecniche avevano bisogno di maestranze specializzate e non. Proprio come oggi in un cantiere: ci sono i "maestri muratori", le "mezze cucchiare", i "manovali" e i diversi ruoli sono più rispettati di quanto si creda. Il resto è letteratura.

Per farsi un'idea della complessità del lavoro basterà riportare un elenco, neppure completo, delle diverse specializzazioni all'interno dell'attività edilizia:

— *calcis coctores* = fornaciai;
— *structores* = muratori;
— *arcuarii* = costruttori di volte e archi;

— *parietarii* = tramezzatori;
— *tectores* =intonacatori;
— *albarii* = gessaiuoli e stuccatori;
— *caementarii* = addetti al conglomerato (?);
— *silicarii et lapidarii* = tagliatori di pietre (cortine,pietrame minuto ecc.);
— *quadratarii* = tagliatori di pietre di grandi dimensioni;
— *marmorarii* = scultori, marmorari;
— *dolabrarii* = minatori o sterratori;
— *metallarii* = minatori o cavatori;
— *figuli* = fabbricanti di laterizi;
— *sectores materiarum* = segatori di legname lungo;
— *tignarii* = carpentieri;
— *clavarii materiarum* = fabbricanti di cavicchi e chiavi per assemblaggi;
— *lignarii* o *intestinarii* = ebanisti, falegnami;
— *fabri* = fabbri.

All'elenco vanno poi aggiunti i pavimentisti, i tettaroli ecc.

8.1. L'organizzazione del cantiere

Trattare dei sistemi di costruzione romani significa avere sempre presenti le diversità di ambiente in cui i sistemi vennero applicati. Questo perché ogni volta che l'attività edilizia romana si è sovrapposta ad altra cultura architettonica, si è adattata alla differente concezione spaziale usando spesso accorgimenti strutturali e tecniche notevolmente diversi. Per questa ragione quanto si dirà dell'organizzazione del cantiere è limitato all'ambito strettamente romano o, al più, centroitalico.

Ogni cantiere, anche per costruzioni modeste, ha sempre avuto bisogno di un'organizzazione razionale per poter funzionare e per risultare economico e sicuro sia per gli incidenti sia per i furti. In linea generale un impianto ottimale aveva bisogno di: delimitazione e recinzione dell'area; ingressi in relazione alla viabilità esterna divisi in principali (per i carri) e secondari (per i pedoni); distribuzione razionale di tutti i servizi inerenti alla fabbrica per avere un certo grado di sicurezza sul lavoro, i trasporti più brevi possibile, e un complesso di disposizioni che evitassero false manovre, ingombri inutili ecc.; pesa per i carri; baracca (loggia) per l'impresa con abitazione, anche se elementare, per il guardiano; tettoia per il deposito delle calci, di dimensioni convenienti alla fabbrica da eseguire. Palchetti in legno sollevati da terra per evitare l'umidità; bagnamento (truogoli e fosse da calce) adiacente alla tettoia; deposito di pozzolana, sabbia, laterizi, pietrame ecc.; deposito di ferri; fucina adiacente al deposito per la lavorazione dei ferri e la riparazione degli attrezzi; deposito del legname da cantiere; laboratorio da falegname per la riparazione degli attrezzi e i lavori attinenti alla carpenteria; deposito degli attrezzi; latrine.

Serviva poi una complessa organizzazione per l'approvvigionamento continuo di tutti i materiali necessari. I depositi di questi dovevano collocarsi nei luoghi più convenienti per l'impiego e per la conservazione: così la calce e la pozzolana andavano presso i bagnoli, le pietre e i laterizi vicino alle andatoie dove passavano gli operai per salire sui ponti o i castelli o comunque nelle vicinanze delle macchine elevatorie.

Naturalmente però la strutturazione era estremamente flessibile e veniva adattata di volta in volta alla forma stessa della costruzione da effettuarsi. Anzi, quasi sempre la ristrettezza dello spazio non consentiva la disposizione ottimale dei vari servizi e allora si ricorreva all'occupazione di alcuni locali della stessa fabbrica che si andava innalzando, chiudendoli temporaneamente e sistemandoli alla meglio a seconda del bisogno. Dove c'erano aree a disposizione (come, per esempio, in occasione delle fondazioni coloniali) oppure per i complessi di grandi dimensioni (teatri, anfiteatri, circhi, stadi, terme pubbliche ecc.) era naturale che lo spazio venisse sfruttato.

Facciamo il caso dell'impianto di una colonia: era opera complessa e unica, perché riesce difficile immaginare l'iterazione dello stesso schema compositivo in situazioni diverse. Escluse le ovvie linee concettuali generali, la definizione del reticolato stradale, il tracciato delle mura, la sistemazione delle porte sul sistema viario extraurbano, sono tutte conseguenze dello studio di quella particolare situazione topografica, strategica, orografica, della disponibilità a breve distanza del materiale da costruzione, delle risorse idriche, insomma di tutta la serie di variabili che non possono mai essere le stesse per due posti diversi.

L'impianto, proprio per questo, è operazione che comporta tempo così come ha bisogno di tempo la costruzione di tutti gli edifici sia pubblici che privati. E d'altra parte è inimmaginabile un impianto coloniale chiuso al momento stesso della fondazione senza che si prevedessero successive espansioni.

Così può essere stato frequente il caso che il cantiere relativo a un edificio fosse impiantato nel lotto adiacente se questo era ancora libero e sul quale magari si costruì 20 o 30 anni più tardi, o addirittura mai.

I resti di vita o gli apprestamenti che lo scavo rimette qui in luce possono dunque riguardare il cantiere dell'edificio adiacente, e non un'occupazione del suolo di fase anteriore, o magari attrezzature caratterizzanti la fabbrica ritrovata. Così avvenne, per citare un esempio, nello scavo dell'edificio di Eumachia a Pompei. Nell'area del portico furono trovate «10 vasche di diversa dimensione, due lavatoi e 10 bocche di cisterne: onde vuolsi che Eumachia ne avesse ceduto l'uso [dell'edificio] ai fulloni, che qui avevano prima diverse officine» (Fiorelli, 1875, p. 260). Tutto questo fu smentito dai saggi del Maiuri (1942, p. 42) che dimostrarono come si trattasse di «vasche provvisorie per calce e impasti cementici necessari alle esigenze stesse della costruzione». Da ricordarsi che nel 79 d.C., al momento della distruzione definitiva, il monumento era ancora sotto restauro per i danni del terremoto del 62.

Tuttavia, lo si è già detto, lo stesso periodo di costruzione, non di rado prolungatosi per decenni (si pensi al Foro di Augusto in costruzio-

ne per 42 anni, o all'*Olimpieion* di Atene iniziato sotto i Pisistratidi e ultimato da Adriano oltre mezzo millennio più tardi) può aver finito col costituire una vera e propria "vita" che ha lasciato tracce più o meno evidenti, ma sempre considerevoli nelle strutture definitive. Questa consapevolezza ci agevola nel processo conoscitivo perché dilata di molto il campo delle ipotesi da considerare.

È possibile, per esempio, che la costruzione non abbia avuto carattere continuativo e che nell'intervallo, o negli intervalli, si siano introdotte nuove tecniche. C'è il caso poi che l'edificio interrotto non sia mai stato portato a termine nella sua sostanza strutturale per cui non funzionò mai (il cosiddetto Tempio della Tosse a Tivoli) oppure che non sia stato portato a termine nel dettaglio decorativo (la Porta Palatina a Torino, il Colosseo o lo stesso *Tabularium* a Roma).

Può darsi che vi siano stati cambiamenti di progetto per meglio aderire all'idea architettonica di base o al funzionamento (porte richiuse, percorsi modificati ecc., con conseguente alterazione dei caratteri distributivi).

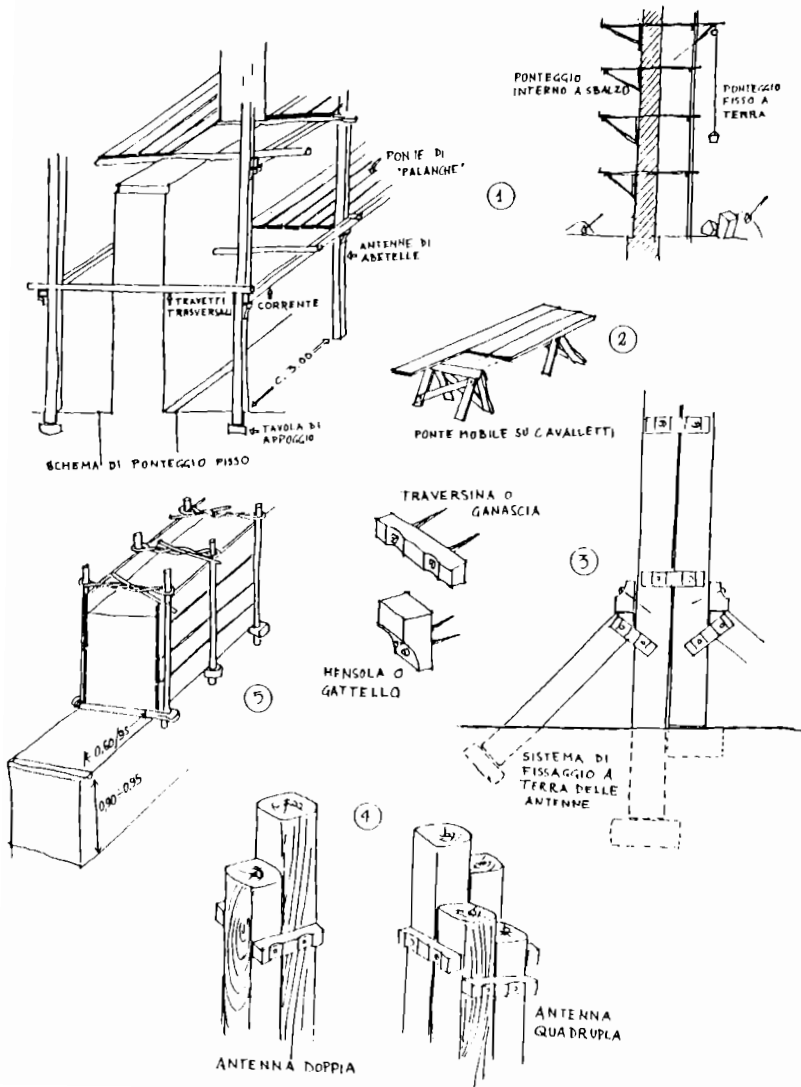
Nel caso di costruzioni per spettacoli (teatri, anfiteatri ecc.) oppure funzionali (magazzini, terme) o rappresentativi (fori, recinti templari ecc.) era logico che si approfittasse delle are comprese all'interno del complesso stesso per impiantare il cantiere. A mano a mano che la costruzione procedeva poi si sarà provveduto ad adattare provvisoriamente i vani già realizzati. In tale caso l'invadenza del cantiere era molto limitata rispetto al tessuto urbano circostante, se escludiamo però l'impatto sempre molto considerevole del flusso dei trasporti.

Non è infatti escluso che sia stata proprio l'opportunità di non sconvolgere troppo l'assetto di vita della maglia urbana, unita alla più facile reperibilità di aree idonee oltre che agli indubbi vantaggi di ordine pubblico, a far preferire per molti di questi edifici zone periferiche o addirittura extraurbane.

8.2. I ponteggi

In antico col termine *machina* si indicavano anche i *ponti di servizio* (Cic., *Verr.*, I, pp. 145 ss.) connessi al cantiere per l'elevazione dei muri di fabbrica. Si trattava di impalcature provvisorie (fig. 8.1 dis. 1) su cui bisognava per gli operai, i materiali di pronto impiego, gli attrezzi. Con il termine *ponte* si intende esclusivamente il tavolato su cui lavorano i muratori ma il significato è spesso esteso all'intera armatura (= ponteggio).

I ponteggi *esterni*, quelli posti lungo il perimetro della fabbrica, si svolgevano per l'intera altezza della costruzione: quelli *interni*, quando possibile, erano limitati ai singoli piani. Entrambi i tipi erano pesanti, fissi. Quelli leggeri e mobili venivano impiegati per lavori di scarso impegno statico come i restauri, le rifiniture ecc., e spesso erano ponti montati su cavalletti, come quelli rappresentati in alcune pitture (fig. 8.1 dis. 2).

FIGURA 8.1
Ponteggi

È evidente che le armature più impegnative erano quelle esterne: erano composte di *antenne verticali, correnti longitudinali, travetti trasversali e tavole* (*palanche*).Le antenne erano composte di due o più *abetelle* unite insieme, infisse a terra (fig. 8.1 dis. 3) e per evitare che affondassero nel terreno veniva loro sottoposta o una tavola di legno forte per allargarne il piede o un masso di pietra.

L'abetella era l'elemento principale per i ponteggi lignei: si trattava di un palo grossolanamente squadrato. Il nome viene dall'abete da cui in tempi recenti era regolarmente ricavato, ma sembra che in antico si usasse prevalentemente il castagno, più forte e tenace. I giunti erano realizzati con due o quattro *ganasce* poste alla distanza di circa m 0,50 sulla verticale.

L'intervallo delle antenne era ovviamente proporzionale all'impegno della costruzione: un uso normale prevedeva una cadenza oscillante intorno ai 3 m (= 10 piedi). Nei ponteggi particolarmente robusti le antenne regolari potevano essere fatte con quattro abetelle anziché due (fig. 8.1 dis. 4).

Dato che per gli assestamenti del suolo e per la tendenza delle antenne a conficcarsi nel terreno il ponteggio tende a distaccarsi dalla parete uscendo fuori piombo, si provvede a dare un'inclinazione verso l'interno pari al 3%. Questo avrebbe comportato una sensibile riduzione dei ponti superiori rispetto a quelli di base nel caso di costruzioni molto alte. Facciamo il caso del Colosseo che supera i 40 m: se si partiva a 2 m da terra con un ponte largo 3 m, al coronamento esso si era ridotto a m 1,80. Bisogna dire, però, che nei ponteggi antichi il pericolo del ribaltamento era molto ridotto, almeno nelle murature a cortina non lapidea, perché i travetti che reggevano il tavolato attraversavano spesso l'intero muro costituendo un ancoraggio efficacissimo.

Quello delle traverse che venivano quasi sempre segate a filo delle cortine e lasciate nel muro è un problema con diversi risvolti. Non sempre, infatti, i fori passatori (che attraversano l'intera parete) e che designamo come *fori da ponte*, possono spiegarsi con questa funzione. In molti casi, infatti, partono da un'altezza da terra che non si concilia con i ponteggi (m 0,90/1,00 in alcuni casi a Villa Adriana) oppure hanno cadenza verticale di m 0,90 (Villa dei Quintili a Roma). Per di più, con una certa frequenza hanno sezione troppo piccola rispetto a quella che ci aspetteremmo per traverse di sostegno, anche se per questo c'è da dire che potevano sopperire alla sottigliezza con la cadenza ravvicinata (m 0,60/0,95 rispetto ai m 1,30/1,40 di oggi).

In sostanza possiamo immaginare che non tutti i *fori da ponte* che si notano nelle pareti antiche abbiano servito a questo scopo, ma che almeno in alcuni casi possano essere relativi a cassaforme mobili per evitare lo spanciamento dei muri in costruzione rapida (fig. 8.1 dis. 5), e che sempre abbiano costituito catene interne al muro di collegamento tra le due cortine, e ancoraggi per ponti esterni. Questa funzione attribuita a elementi lignei inseriti nelle mura di città ci è descritta da Vitruvio (1, 5, 3), ed è stata generalmente riconosciuta come qualcosa di simile al lavoro svolto dai diatoni o ai ricorsi di bipedali. È intuitivo che in cadenze

FIGURA 8.2
Pulegge

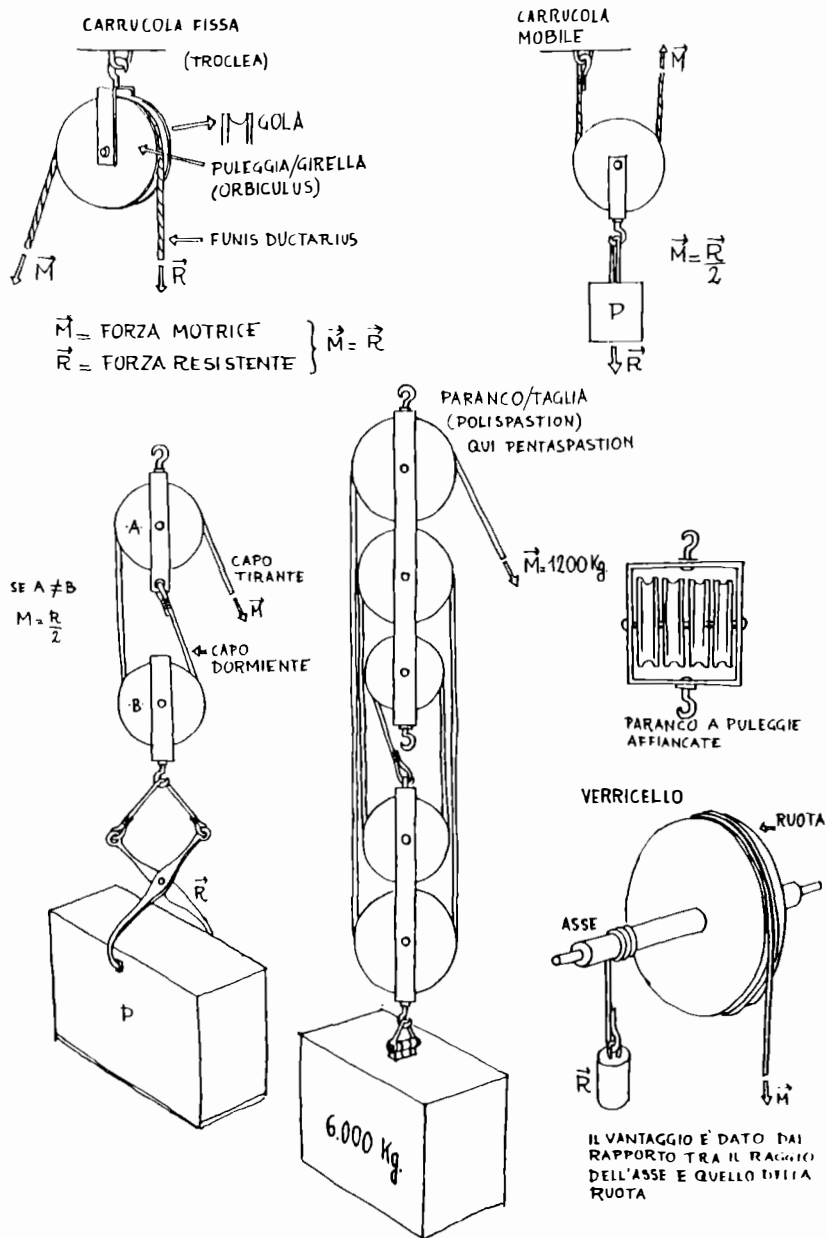
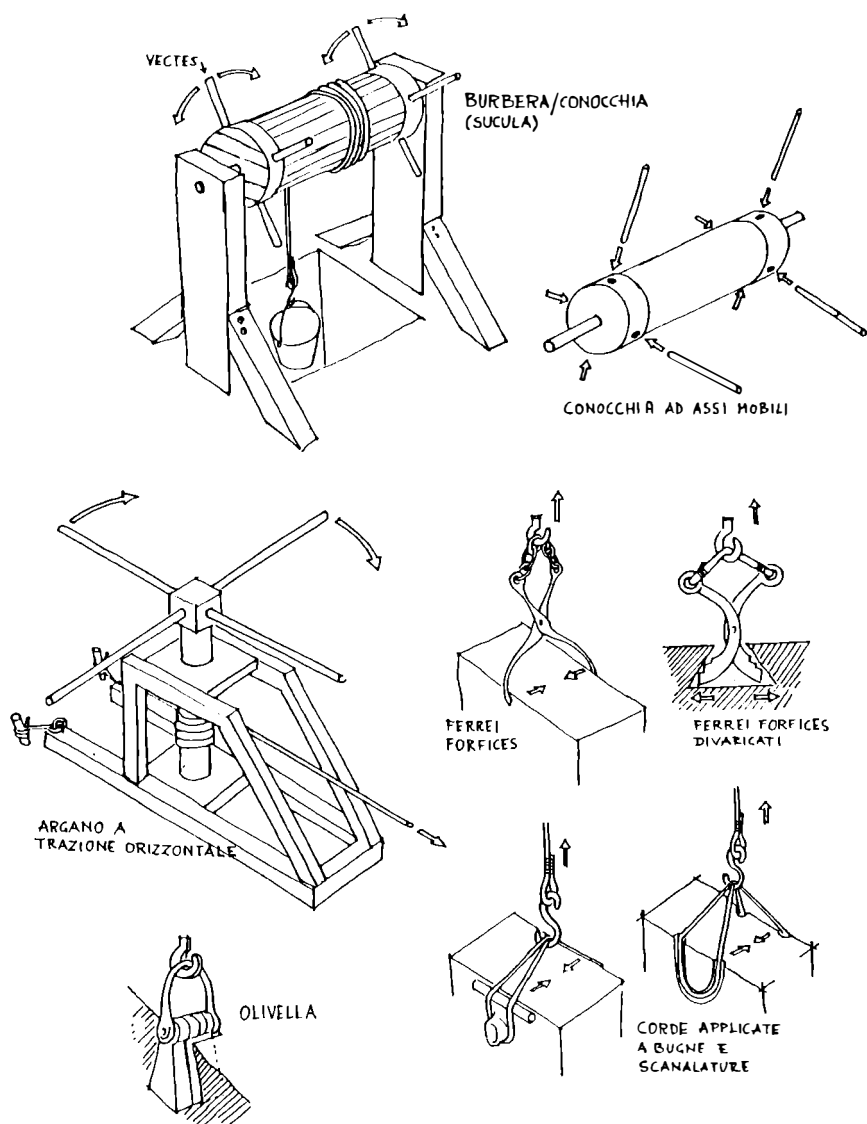



FIGURA 8.3
Verricelli e sistemi di aggancio

verticali come quella della Villa dei Quintili solo una fila ogni due (= m 1,80) avrà retto il ponte.

A titolo di esempio, si riporta il ritmo dei *fori da ponte* riscontrati nelle cosiddette Terme con *Heliocaminus* di Villa Adriana: primo ordine di fori dal basso = m 0,70/0,90 dal calpestio definitivo; ordini successivi = m 1,25/1,50 senza cadenza precisa; intervallo tra i travetti di una stessa fila = m 0,60/0,95.

È molto probabile che per risparmiare legname il tavolato di un piano fosse smontato e trasferito al ponte superiore col crescere del muro, questo almeno fino a una certa altezza, oltre la quale i ponti conservati dovevano essere due cosicché un eventuale crollo di quello superiore fosse arrestato da quello inferiore.

Altri elementi importanti dei ponteggi erano i piani inclinati (*andatoie*) di accesso ai vari piani in corrispondenza dei quali si raddoppiava con ogni probabilità la cadenza delle antenne, e il *castello*, il settore destinato alle macchine elevatorie e quindi quello più robusto di tutta l'impalcatura, collocato strategicamente in modo da servire l'area più ampia possibile.

8.3. Macchine elevatorie e tractorie

Gli antichi conoscevano e usavano la leva, il cuneo, la vite, la puleggia e il verricello (argano) che uniti e applicati a macchinari lignei indicati con il nome generico di *varae* e combinate con sistemi ingegnosissimi e complicati sviluppavano le notevoli energie occorrenti a sollevare pesi considerevoli (per esempio, blocchi per l'attico del Colosseo innalzati a oltre m 40 o al sollevamento degli obelischi ecc.).

Certamente i romani si erano molto avvantaggiati delle esperienze e delle teorie della meccanica ellenistica, soprattutto alessandrina, tanto nel campo militare come in quello civile, ed è praticamente impossibile stabilire quale sia stato il loro apporto originale. Anche se è intuibile che proprio sotto la spinta dell'attività edilizia, e delle campagne militari, dovettero verificarsi grandi progressi.

Alla base delle macchine *tractorie* ed *elevatorie* troviamo principi elementari come la capra (*rechamus*) cui era appesa la carrucola (*trochlea*), il verricello (*sucula*), i paranchi semplici e differenziali (*machina tractoria*; figg. 8.2-8.4) di cui abbiamo le descrizioni (Vitr., 10, 1, 1 ss.).

L'energia che faceva muovere queste macchine era prevalentemente quella muscolare, umana più spesso che animale, tanto "volontaria" quanto "involontaria". Il primo tipo implicava appunto la volontà di sforzo da parte dell'uomo, il secondo, come nel caso della "ruota calcatoria", comportava che l'energia fosse fornita solo dallo spostamento del peso degli operai che camminavano all'interno della ruota (fig. 8.6).

Naturalmente è difficile immaginare che si potesse costruire utilizzando esclusivamente la capra e i suoi derivati, dati i limitatissimi movimenti di sbraccio che questi macchinari ammettevano. È così indispensabile immaginare l'esistenza di vere e proprie gru a braccio, di quelle testimo-

FIGURA 8.4
Macchine elevatorie

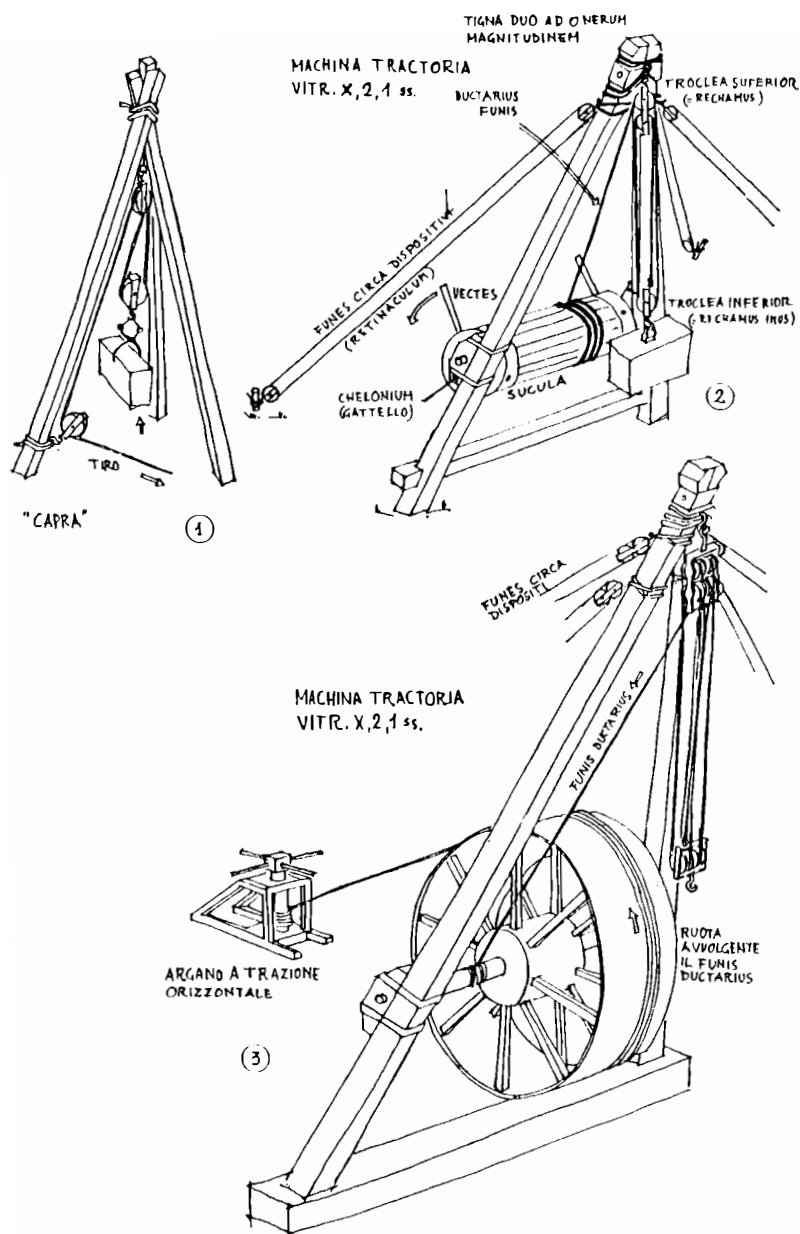
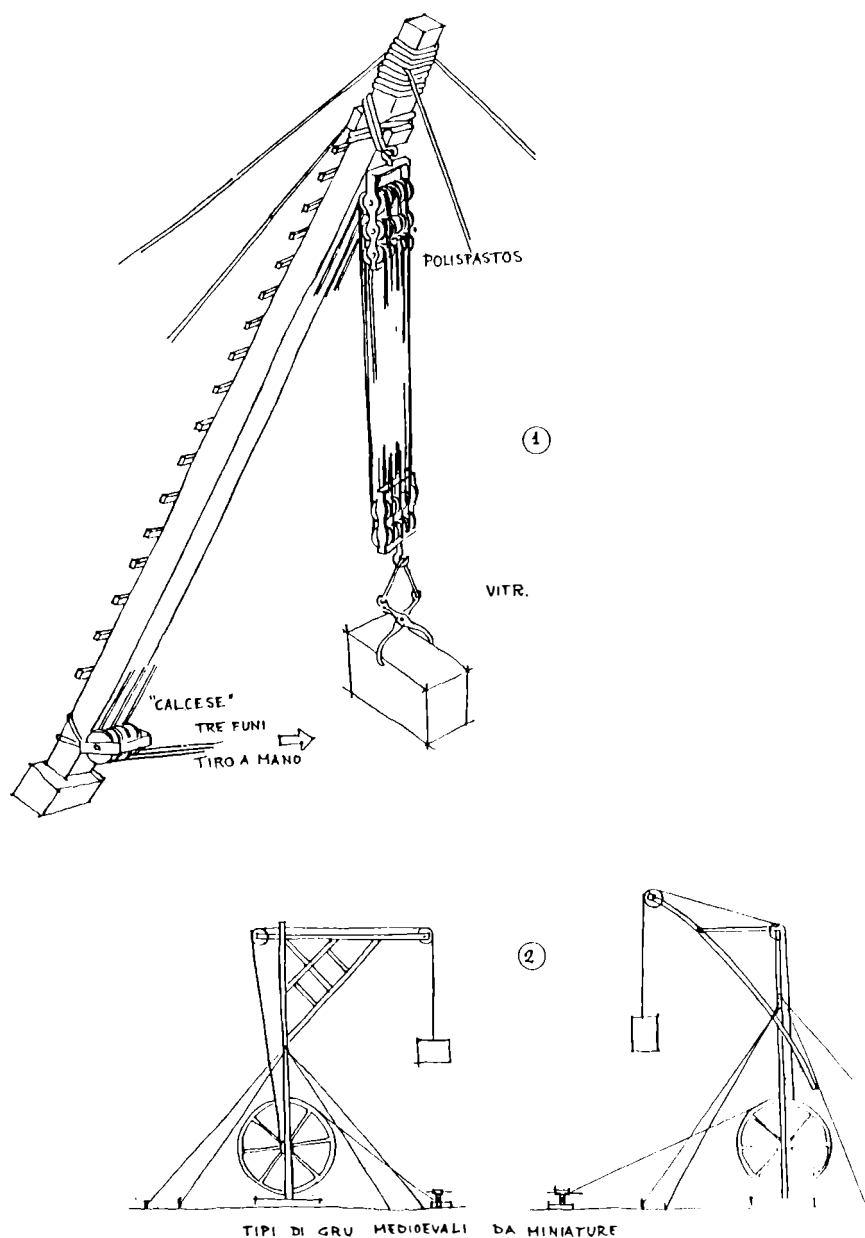



FIGURA 8.5
Macchine elevatorie

niate in tante miniature medievali (fig. 8.5 dis. 2), in apparenza molto vicine alle gru moderne. A differenza di queste, avevano soltanto il movimento elevatorio e rotatorio, mentre quello traslatorio è attestato per la prima volta come invenzione del Brunelleschi per la costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore. Questa macchina fu riprodotta per almeno un secolo in vari disegni, ma gli unici realmente tecnici sono quelli fatti da Bonaiuto Ghiberti e Leonardo da Vinci, che ci hanno permesso di ricostruirne il modello, mentre gli altri, limitati a una rappresentazione pseudo tecnica, erano solo un ghirigoro grafico lontanissimo dai principi della meccanica. Questo tipo di gru con i tre movimenti (elevatorio, rotatorio e traslatorio) fu poi dimenticato per essere reinventato verso la metà del XIX secolo.

Aggiungiamo di seguito, per testimoniare la complessità raggiunta dalla meccanica in età augustea, la traduzione del testo di Vitruvio che riguarda il problema (10, 2, 1).

Cominceremo dunque a parlare di quelle macchine che servono per fabbricare i templi e le opere pubbliche in genere. Esse si costruiscono così: si prendono due travi di dimensioni proporzionate ai pesi che dovranno sollevare. Queste travi vanno erette collegandole in testa per mezzo di un perno e divaricandole alla base. Vengono poi tenute ferme con funi legate alle estremità superiori e disposte tutt'intorno. In alto si attacca una carrucola, che alcuni chiamano *rechamus*. Nella carrucola troveranno posto [due] girelle [*orbiculi*], rotanti ciascuna attorno al proprio asse.

Poi si fa passare la fune di trazione [*funis ductarius*] attraverso la girella superiore e si fa discendere attorno alla girella della carrucola inferiore. Di qui la corda ritorna alla girella più bassa della carrucola superiore, per poi scendere nuovamente a quella inferiore ed essere legata al foro di questa. L'altro capo della corda va riportato al piede della macchina.

Sulla fascia posteriore delle travi, dove sono divaricate, vanno fissati dei supporti forati [*chelonia*] in cui si inseriscono le teste dell'asse della conocchia [*sucula*], in modo che l'asse possa ruotare comodamente.

Queste conocchie devono avere ai capi estremi due fori, fatti in modo da potervi adattare le leve. Alla carrucola inferiore vanno quindi attaccati i *ferrei forfices*, le cui punte debbono adattarsi ai fori praticati nei blocchi di pietra.

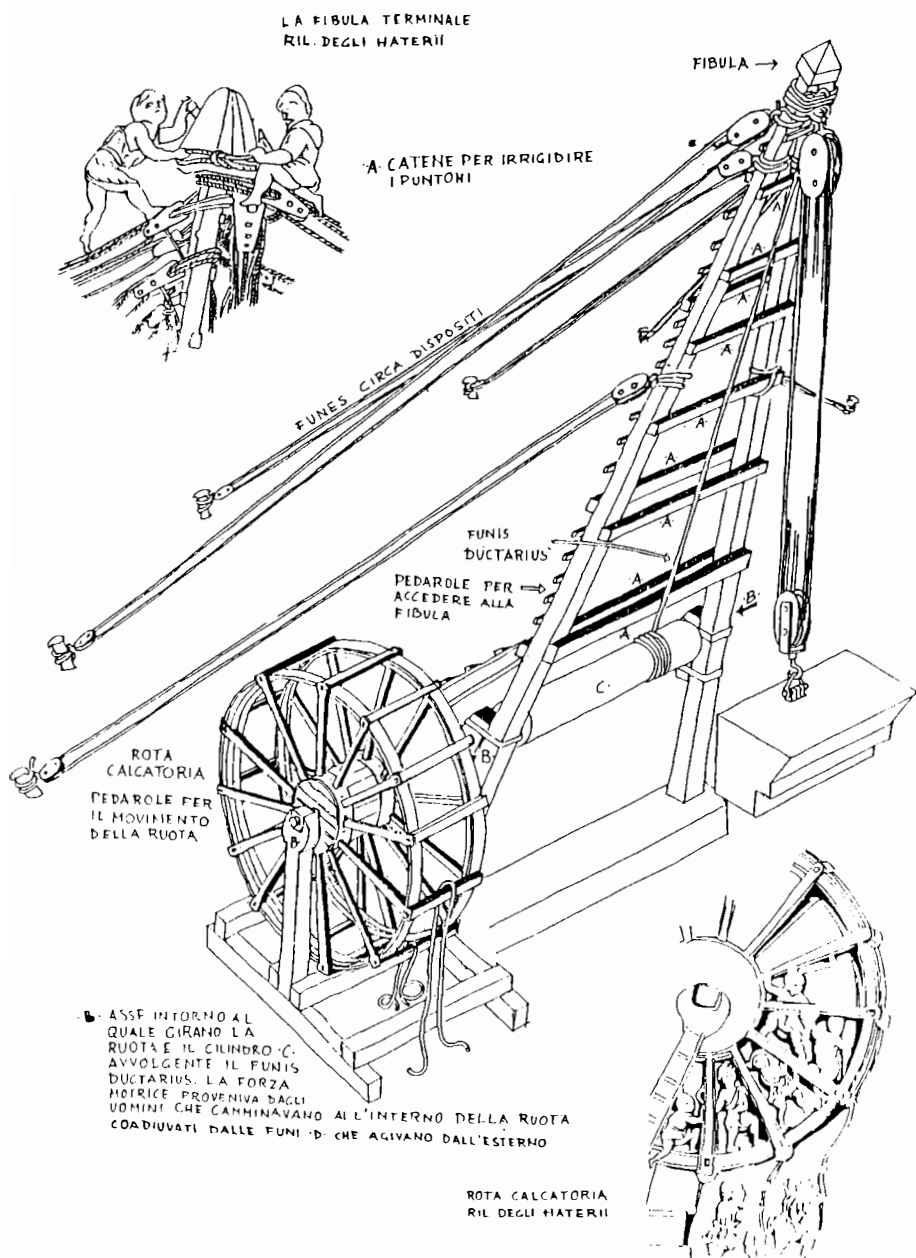
Quando, dopo aver fissato un capo della func alla conocchia, questa viene fatta ruotare per mezzo delle leve, la fune avvolgendosi alla conocchia si tende e così solleva il carico all'altezza e nel punto necessari [fig. 8.4 dis. 2].

Questo tipo di macchine che funziona con tre girelle viene chiamato *trispastos*. Se nella carrucola inferiore vi sono due girelle e in quella superiore tre si chiama invece *pentaspastos* [fig. 8.2].

Nel caso si debbano costruire macchine adatte a spostare grandi pesi, bisogna adoperare travi molto lunghe e di grande sezione. La concezione della macchina resta però la stessa: le travi vanno sempre collegate in alto e la trazione esercitata per mezzo della conocchia posta al piede.

Fatto questo, si passano le funi di trazione che per il momento vanno lasciate lente. I tiranti [controventi] tesi dalla parte alta della macchina si debbono fissare ad una certa distanza. Se non c'è dove fissarli si piantano a terra pali inclinati e consolidata con battipalo [*fistuca*] la zona intorno vi si legano le funi.

Fissata con un canapo la carrucola alla sommità della macchina, si fa passare una fune da qui ad un palo, o, meglio, ad un'altra carrucola legata ad un palo.

FIGURA 8.6
Macchine elevatorie

Questa fune ne avvolge quindi la girella per tornare poi alla carrucola legata in testa alla macchina.

Dopo essere passata attorno alla girella, discende dall'alto, ritornando alla conocchia posta al piede della macchina dove viene finalmente legata.

Facendo ruotare la conocchia per mezzo delle leve, la macchina si alzerà da sé, senza alcun rischio. Così, fissate le funi e i tiranti ai pali disposti all'intorno, si appresta qualunque macchinario di grandi dimensioni.

Le carrucole e le funi di trazione vanno organizzate come si è detto. Qualora però l'opera comportasse il sollevamento di carichi di dimensioni e peso colossali, la conocchia non sarà più sufficiente. Ma allo stesso modo della conocchia tenuta dai supporti bisognerà usare un grande timpano che alcuni chiamano *rota*, i Greci *amphieren*, mentre altri *perithecium*.

In macchine di questo tipo le carrucole debbono avere una diversa organizzazione: infatti avranno due ordini di girelle sia nella carrucola superiore sia in quella inferiore.

La fune di trazione va allora passata nel foro della carrucola inferiore così che, una volta tesa, sia uguale da entrambi i capi. Una cordicella, stringendo le due parti della fune a ridosso della carrucola inferiore, impedirà alla corda stessa di scorrere a destra o a sinistra.

Fatto questo, i capi delle fune debbono essere riportati alla carrucola superiore dalla parte esterna, poi scendono di nuovo alle girelle inferiori e le avvolgono girando dal basso; ripartendo quindi uno a destra e l'altro a sinistra, verso l'alto avvolgono le girelle della carrucola superiore. Di qui per l'esterno si portano, passando a destra e a sinistra della ruota, sull'asse e ad esso vanno fissati. Intorno alla ruota si avvolge un altro canapo fissato ad un argano che farà girare la ruota e l'asse. Allora le funi si tenderanno in modo eguale da entrambi i lati, e solleveranno il carico senza pericoli [fig. 8.4 dis. 3].

Adoperando una ruota molto grande collegata o nel mezzo o da un lato, la macchina potrà funzionare anche senza l'argano, direttamente azionata a piedi dagli operai [fig. 8.6].

Esiste anche un altro tipo di macchina molto ingegnosa e pratica, che tuttavia non può essere manovrata se non da gente esperta. Consiste in una grossa trave che va drizzata e tenuta ferma da tiranti tesi in quattro diverse direzioni. Sotto l'attaccatura dei canapi vanno fissati due supporti [*chelonia*] al di sopra dei quali si deve collegare con funi una carrucola. Sotto questa va messa una tavola lunga circa due piedi, larga sei dita, grossa quattro.

Le carrucole devono avere tre ordini di girelle disposte in orizzontale; alla macchina vanno collegate tre funi di trazione. Esse, partendo dalla carrucola superiore, scendendo per l'interno a quella inferiore, avvolgono le girelle più alte. Da qui salgono alla carrucola superiore e ne attraversano le girelle più basse passando dall'esterno all'interno.

Tornando giù per l'interno vanno ad avvolgere il secondo ordine di girelle, quindi risalgono passando per quelle del secondo ordine alla carrucola superiore. Ridiscese al basso, risalgono per l'ultima volta e, avvolgendo le girelle più alte, ritornano infine alla base della macchina. Qui va posta una terza carrucola che noi Romani chiamiamo *calcese*. Anche questa, che va fissata alla base della trave, deve avere un triplice ordine di girelle, attraverso cui passeranno le tre funi da tirare a mano.

Questa macchina permette perciò, per mezzo della trazione a mano di tre squadre di operai, di sollevare celermente i carichi senza bisogno di argani. Essa si chiama *polispastos*, perché fornisce comode e rapide prestazioni attraverso un

sistema di molteplici girelle. Un altro vantaggio è dato dall'impiego di una sola trave, che potendo ruotare a destra e sinistra, consente di deporre il carico dove si vuole [fig. 8.5 dis. 1].

Tutte le macchine descritte trovano impiego non solo nell'edilizia ma anche nelle operazioni di carico e scarico delle navi. In tal caso possono essere o verticali o orizzontali, fissate ad argani rotanti. Lavorando analogamente a terra, senza bisogno di erigere le travi ma con le stesso sistema di funi e carrucole, si possono anche tirare a riva le navi.

9

Cenni sul consolidamento nell'antichità

Sulla precarietà statica di alcune costruzioni romane ci informa Giovenale (Sat., 1, 3) con un quadro di sorprendente attualità:

> chi ha mai temuto che gli cascasse addosso la casa nella fresca Palestrina o a Bolsena, fra i colli boscosi, oppure nella semplice Gabii, o ancora sul colle di Tivoli che digrada in declivio? Noi invece abitiamo in una città [Roma] che per la maggior parte si regge su esili puntelli, unico provvedimento offerto dagli amministratori alle strutture fatiscenti. Le lesioni dei vecchi dissesti murari vengono stuccate e poi ci ordinano di dormire tranquilli in un edificio in pericolo di crollo.

A questo fa riscontro quanto, sempre Giovenale, riferisce a proposito del pericolo degli incendi:

> il terzo piano, subito sotto di te, già è invaso dal fumo. Tu ancora non lo sai, perché mentre tutti si danno da fare nei piani più bassi, quelli che alloggiano nelle soffitte, nei sottotetti che riparano solo dalla pioggia [...] quelli finiscono sempre arsi vivi.

La conoscenza delle antiche tecniche di consolidamento è scarsissima perché le fonti letterarie ne danno solo rapidi cenni, e l'esame dei resti archeologici, particolarmente difficile in questo campo, è ancora sostanzialmente da impostare.

Tra le fonti letterarie contiamo, al solito, Vitruvio che tiene presente il problema dei restauri funzionali quando raccomanda provvedimenti durante la costruzione che permettano di ridurre al minimo le opere di puntellamento in caso di interventi di restauro o sostituzione di parti strutturali (cfr. par. 4.1).

Anche Cicerone (*Verr.*, 2, 50 ss.), descrivendo lo smontaggio e il rimontaggio delle colonne del Tempio dei Castori al Foro Romano, dà, a ben guardare, indicazioni relative alle tecniche di consolidamento.

Si tratta della nota operazione truffaldina organizzata da Verre ricorrendo a un appalto truccato per rimettere a piombo le colonne del tempio. In questo caso si fece ricorso, come del resto era intuibile, a ponteggi e macchinari elevatori.

La fonte più importante a mio avviso resta però il passo di Seneca (*De benef.*, 6, 15, 7) in cui egli dichiara la propria ammirazione per l'a-

bilità degli architetti capaci di ricostruire il piano terreno di un edificio (*domus*) – evidentemente procedendo per settori – salvando con opportune puntellature l'*insula* soprastante. Si intuisce naturalmente l'importanza di questo tipo di interventi per gli studi archeologici dal momento che, anche se in percentuale irrilevante, potrebbe verificarsi il caso di una "stratigrafia costruttiva" inversa: cioè si potrebbe incontrare un edificio in cui il piano superiore sia, anche sensibilmente, più antico di quello inferiore.

Altre fonti che certo andrebbero tenute in maggiore considerazione per quanto attiene al consolidamento strutturale sono quelle epigrafiche. Spesso i monumenti portano incise formule come *restauravit ab imis* o *ab imis fundamentis* che sembrano smentite dalla sostanza della parte monumentale superstite, appartenente con evidenza alla fase precedente il restauro dichiarato. Così potrebbe essere facile vedere nella formula epigrafica una forzatura a fini propagandistici; in questo caso però la propaganda sarebbe stata destinata ai posteri, non certo ai contemporanei. Tuttavia non possiamo escludere che una, più d'una, o addirittura tutte queste formule, pur con qualche tara imposta dalla retorica e dall'intenzione propagandistica, dichiarino interventi reali. Naturalmente bisogna prima di tutto intendersi sulle tecniche del restauro, del consolidamento, della ricostruzione. In antico non esisteva il concetto di restauro conservativo staccato dalla funzionalità, come invece quasi sempre lo ammettiamo noi, ma piuttosto quello finalizzato al mantenimento o al ripristino della funzionalità della costruzione, e che quindi poteva andare dalla ritessitura del manto di tegole al vero e proprio consolidamento statico con o senza ristrutturazione.

Il consolidamento statico "dalle fondamenta" – quello per intendersi che oggi persone accorte affidano *sempre* a un ingegnere strutturista – non è affatto detto che sia sinonimo di "ricostruzione dalle fondamenta", anzi, nella normalità delle cose, significa esattamente l'opposto.

Facciamo un esempio: se per difetto o incidente di fondazione un edificio aveva subito un consistente dissesto statico che interessava l'intero suo volume e lesioni più o meno evidenti ne pregiudicavano la stabilità funzionale, era buona norma, come del resto lo è ancora, intervenire a partire proprio dalle fondazioni. Allora si sottofondava, si ristabilivano i necessari vincoli orizzontali (volte, solai) e verticali (ammorsature tra muri di telaio e divisori, ripresa a "cuci e scuci" delle lesioni, delle piattabande, degli archi ecc.).

Interventi di questo tipo, proprio perché mirati a salvare la maggior parte delle strutture esistenti, risulteranno assai meno evidenti della massa muraria precedente; eppoi occorrerebbe che fossero scoperti, il che in genere non avviene nelle fondazioni, e bisognerebbe anche saperne riconoscere le tracce.

Non c'è quindi da stupirsi se un *restauravit ab imis fundamentis* risulta sostanzialmente invisibile: era proprio così che doveva essere. Naturalmente questo avveniva quando si doveva evitare l'ingombro di strutture in vista come contrafforti, archi di sostegno ecc. provvedimenti del resto non sempre possibili né sempre adatti.

Con ciò non si intende certo negare l'esistenza di ingiustificate vanterie a livello epigrafico, ma soltanto che prima di consacrarle come tali è d'obbligo escludere che vi siano tracce, dalle fondazioni in su, per tutta la parte restante, di opere di consolidamento.

Certo non è facile riconoscere queste tracce, ma non immaginandone neppure l'esistenza diventa impossibile. D'altra parte sappiamo che già al momento della costruzione erano ammessi eventuali interventi di consolidamento come dimostrano i "cagnoli" delle centine sospese e dei ponteggi a sbalzo lasciate in opera per essere riadoperate in caso di ulteriori interventi (cfr. ponti stradali, acquedotti ecc.).

Esempi poi di consolidamenti radicali ed evidentissimi si hanno negli acquedotti (per esempio, Celimontano, Claudio) o in alcuni palazzi ostiensi (Caseggiato degli Aurighi) o in molti edifici pompeiani. Gli acquedotti per funzionare dovevano essere rigidi almeno al livello dello *specus* dove anche una minima lesione pregiudicava rapidamente il funzionamento dell'opera. Questa necessità d'altra parte era in contrasto con la stessa filosofia strutturale dell'acquedotto che essendo un elemento lunghissimo e lineare affrontava fatalmente disomogeneità di terreno e di costruzione che in breve tempo ne rendevano necessario il restauro funzionale.

Il sistema di consolidamento più frequente fu l'uso di archi di sostegno a una o più ghiere e spesso a due ordini sovrapposti. Questi nuovi archi, con spalle proprie, riducevano la luce di quello vecchio ingrossandone il pilone (e quindi il terzo medio di partenza) e inoltre, essendo in serie, riportavano costantemente sulla verticale eventuali spinte che se ne fossero allontanate (fig. 3.19).

Bisognerebbe indagare se questa operazione coinvolgeva, come sembra verosimile, anche le fondazioni che potevano passare dal tipo *isolato* a quello *continuo*, oppure se per il principio della verticalità delle risultanti degli archi a contrasto con piloni non troppo alti, non si continuasse a fare affidamento sulla fondazione del vecchio pilone centrale. Questo però solo in quei casi in cui il restauro fosse dovuto a cause diverse dai cedimenti fondali.

Non possiamo escludere che a seconda dei luoghi, delle condizioni, dell'importanza dei lavori, dell'urgenza e degli altri innumerevoli condizionamenti di una costruzione edilizia, si siano usati entrambi i sistemi.

È naturale che consolidamenti, anche molto rilevanti, non denuncino sempre con chiarezza la loro origine, grazie anche al mediocre stato di conservazione delle strutture archeologiche. Così ci si può confondere tra ristrutturazione "progettata" in previsione di un cambiamento della funzionalità (per esempio, zona inferiore della Domus Augustana), la riparazione di dissesti causati da scosse sismiche, o di danni da assestamento (del terreno come delle strutture) o di errori di progettazione.

Una recente ricerca dell'ENEA ha catalogato dall'anno 1000 a oggi circa 40.000 terremoti sul territorio nazionale, ovviamente di varia intensità e per zone di diversa estensione. Non è difficile immaginare che per un arco di tempo più che doppio, poniamo a partire dal III secolo a.C., i terremoti si possano contare intorno agli 80/100.000. Se ne desume che

non c'è monumento archeologico che non abbia ripetutamente subito sollecitazioni sismiche. Il fatto che possa almeno apparentemente non averne risentito, sarà dipeso da varie cause: dalla giacitura, dalla forma, dal materiale, dalla struttura, dalla fondazione, dalla direzione dell'onda d'urto, dalla nostra incapacità di riconoscerne le tracce ecc.

Certo non è facilissimo attribuire un consolidamento, ammesso che si riesca a individuarlo, a un evento sismico anziché a una delle tante altre cause di dissesto che possono aver interferito nella vita dell'edificio. Tuttavia è importante farne il tentativo per i risvolti cronologici e storici che la soluzione del problema porterebbe con sé.

Ho accennato alla difficoltà di riconoscere le lesioni da terremoto almeno in alcuni casi: è emblematico quello delle due colonne coclidi (Traiana e Antonina): mentre la seconda mostra evidentissimi dissesti da sisma, l'altra, la Traiana, sembra avere solo lesioni attribuibili a dilatazione termica (cfr. par. 2.6).

Il luogo dove meglio si possono studiare gli interventi di consolidamento resi necessari dal danno sismico è certamente Pompei. Questo grazie al fatto che la fine della città nel 79 fu preceduta, nel 62, da un terremoto distruttivo i cui danni dopo 16 anni erano ancora in corso di riparazione. A. Maiuri (1940) ha posto attenzione a questo problema elencando una serie di accorgimenti tecnici finalizzati al consolidamento.

Le strutture pompeiane erano mediocri sia per la cattiva qualità delle murature sia per la quasi totale mancanza di vincoli tra muri perimetrali e divisori (si vedano le facciate di opera quadrata di tufo di via dell'Abbondanza prive di qualunque ammorsatura con le parti retrostanti). È facile immaginare il tipo e l'entità dei dissesti che un terremoto di forte o anche di media intensità provoca in edifici così slegati: a parte i crolli, muri fuori piombo, distacchi di pareti, lesioni ecc.

Gli interventi di ripristino e consolidamento, ancora largamente in corso al momento della catastrofe definitiva, mostrano un grande impegno nel ristabilire (o stabilire per la prima volta) i vincoli tra le diverse pareti attraverso idonee ammorsature, il ricorso a speroni e contrafforti, la sarcitura delle lesioni con il sistema a "cuci e scuci".

In questi interventi, soprattutto negli edifici pubblici (vedi l'area intorno al Foro) si fa ricorso all'opera laterizia ma anche al listato o al reticolato spesso senza una apparente legge precisa. L'indifferenza della tecnica riguarda soprattutto piccole sarciture (catene o catenelle), porzioni di parete, pareti intere o angoli di edifici (o anche intere brecce di occlusione). L'esecuzione degli interventi è decisamente di qualità migliore rispetto alle murature del passato, come materiali, come messa in opera e come concezione tecnica.

Si ha l'impressione marcata che a seguito del terremoto Nerone abbia inviato, se non aiuti economici certo direttive, tecnici e probabilmente anche maestranze capaci di correggere gli errori e le trascuratezze costruttive di base che caratterizzano gli edifici di Pompei (contro l'ipotesi di un simile intervento statale, cfr. Maiuri, 1940).

Precise disposizioni edilizie del resto seguono sempre ogni terremoto che evidenzia negli edifici difetti da correggere, e a Pompei l'attività edi-

lizia tra le due calamità è contraddistinta proprio da questa intenzione oltre che da quella di consolidare.

Un sistema da ricordare per la sua singolare ingegnosità e per l'efficacia è quello adoperato nelle colonne della Grande Palestra. Esse erano in laterizio intonacato e per il restauro si procedette nel seguente modo: dopo avere scrostato l'intonaco alla base per mettere a nudo il laterizio, e avere rimesso a piombo la colonna con imbracature e cunei di legno, si procedette a una colatura di piombo fuso nella fessura, attraverso un doccione di terra refrattaria. In questo modo si ristabilì efficacemente il contatto che era venuto a mancare.

Appendice

Si dà qui uno schema generale, certo non completo, di alcuni elementi di cui bisogna tenere conto nell'esame dei monumenti antichi. Questo non per stabilire *a priori* il binario seguendo il quale si è sicuri di arrivare al risultato, ma solo la traccia di un iter il cui andamento reale sarà imposto di volta in volta dal singolo organismo edilizio, sempre originale.

SCHEMA GENERALE

SCHEMA 1

SCHEMA 2

SCHEMA 3

CARATTERI DELLE STRUTTURE EMERGENTI ORIZZONTALI
pavimenti
terranei
piani intermedi
di sommità
divisioni intermedie
lignee
travi incastrate
travi su corrente su mensole
contignatio
coaxatio transversa
murature massive
dislocazione
forma
materiali
struttura
rivestimento
intradossale
estradossale
finte
controsoffitti
piani
curvi
controcalotte
per coperture lignee
per strutture massive
lesioni
cause
andamento

SCHEMA 4

CARATTERI DELLE STRUTTURE EMERGENTI VERTICALI
parete
compatta
articolata
aperta
pilastri, colonne, porte, finestre ecc.
architrave
struttura
elemento unico
elementi in parallelo
composto
forma
rettilineo
curvilineo
materiale
arco
struttura
conci
a cuneo
pentagonali
a martello
a secco
ingrappati imperniati
muratura
ghiera
blocchetti
laterizi
misto
letti di malta
nucleo
scapoli radiali
scapoli orizzontali
forma
sesto pieno
sesto ribassato
sesto rialzato
policentrico
a collo d'oca
estradossato
pseudoestradossato
a piattabanda
non protetta
protetta
armata
materiale
funzione
telaio
divisorio
tramezzo
recinzione
sostruzione
piena
semplice
imbrigliata
contraffortata
cava
non fruibile
fruibile
criptoportico
vani a pattine
contraffortata
mista
sperone e contrafforte
progettati
aggiunti per dissesto
aggiunti per cautela
altro

rivestimenti
decorativi
intonaco
scalpellatura
chiodatura
crustae di marmo
mosaico
pietra spugnosa
altro
funzionali
impermeabilizzazione
tegulae hamatae
muratura
cocciopesto
riscaldamento
tegole
tubuli
continui
a strisce
individuazione dei nuclei resistenti
al carico
alla spinta
lesioni
cause
andamento
cronologia relativa

SCHEMA 5

CARATTERI DELLE COPERTURE
legno
a falda singola
a doppia falda
a puntoni e colmareccio
a puntoni con spina
a capriata
semplice
con monaco fisso
con monaco sollevato
palladiana
a più falde
in piano
praticabile
non praticabile
metallo
conglomerato cementizio
lesioni
cause
andamento
cronologia relativa
volte
semplici
botte
retta
obliqua
anulare
elicoidale
conoidica
a tromba
vela
su pianta quadrata
su pianta poligonale
a cupola
composte
a padiglione
a crociera
ad ombrello
a spicchi veloidici
a spicchi cilindrici
a falde rialzate
altro
struttura
pietrame omogeneo
pietrame a peso decrescente
con nervature
continue
discontinue
a meridiani
a paralleli
a rete
manto intradossale di laterizio
alleggerite
con anfore
con tubuli
armate con catene metalliche
modalità di costruzione
centina lignea
fissa
sospesa
baule di terra
misto
estradosso
funzione
praticabile
impraticabile
protezione
cocciopesto
spicato
tegole
misto
mosaico
forma
curva
piana
a falde

SCHEMA 6

CARATTERI DELLE MURATURE
malta di argilla e catene lignee
pietrame
mattoni crudi
tegole
altro
con cortina, nucleo e legante
cortine
muratura ordinaria di pietrame regolarizzato
a blocchetti
senza cinture
con cinture
opera reticolata
senza cinture
con cinture
policroma
di cattiva esecuzione (quasi reticolata)
muratura ordinaria di pietrame artificiale
opera laterizia
senza cinture
con cinture
muratura ordinaria di pietrame artificiale e naturale regolarizzato
opera vittata
muratura in pietra da taglio apparecchiata
opera poligonale III e IV maniera
con tracce di sollevamento
senza tracce di sollevamento
con zeppe
senza zeppe
opera quadrata
di testa
di taglio
di testa e di taglio
con grappe e perni
senza anathyrosis
con anathyrosis
muratura in pietra sbozzata
opera poligonale di I e II maniera
muratura ordinaria di pietrame naturale
opera incerta
senza cinture
con cinture
muratura di ciottoli
senza cintura
con cinture
legante
malta semplice
malta pozzolanica
nucleo
calcestruzzo gettato
calcestruzzo allettato
materiali coerenti con la cortina
materiali incoerenti con la cortina
materiali omogenei per l'intera h
materiali a peso specifico decrescente
senza cortina e senza legante
opera quadrata
opera poligonale
solo conglomerato
calcestruzzo da fondazione
calcestruzzo da cisterna (signino)
tapial ecc.

Abbreviazioni bibliografiche

Adam, 1983 = J.P. Adam, *Dégradation et Restauration de l'Architecture Pompéienne*, CNRS, Paris 1983.
Adam, 1984 = J.P. Adam, *La Construction Romaine, matériaux et techniques*, Picard, Paris 1984.
Alberti, *De Re Aed.* = L.B. Alberti, *L'Architettura*, Il Polifilo, 1ª ed., Milano 1966 (trad. G. Orlandi).
Ammiano Marcellino = Ammianus Marcellinus, *Res Gestae*.
Appian. = Appianus, *Historia Romana*.
Aten. *Mech.* = Athenaeus, *Mechanica*.
Ascon. = Q. Asconius Pedianus, *In Scaurianam*.
Azzena, 1987 = G. Azzena, *Atri, L'Enna di Bretschneider*, Roma 1987.
Baggi, 1926 = V. Baggi, *Costruzioni stradali e idrauliche*, UTET, Torino 1926.
Blake, 1947, 1949, 1973 = M.E. Blake, *Ancient Roman Construction in Italy: I. From the Prehistoric Period to Augustus*, Washington 1947; *II. From Tiberius through the Flavians*, Washington 1949; *III. From Nerva through the Antonines*, Philadelphia 1973.
Bowie, 1959 = Th. Bowie, *The Sketchbook of Villard de Honnecourt*, 2ª ed., Indiana University, G. Writtenborn Inc., New York 1959.
Cato, *De Agr.* = Cato, *De Agricultura*.
Cic. = M.T. Cicero, *De Officiis; In Verrem*.
Claud. = Claudianus, *Carmina*.
Colum., *R.R.* = L.I.M. Columella, *De Re Rustica*.
Carettoni, 1983 = G. Carettoni, *Le Anterides di Vitruvio. Un esempio di applicazione pratica*, Analecta Inst. Danici, suppl. X, Odense Univ., Copenaghen 1983, pp. 15 ss.
Castagnoli, 1986 = F. Castagnoli, *Testudo*, in "Mem. Ec. Franc. Rome", 98, 1986, 1, pp. 37-45.
Choisy, 1873 = A. Choisy, *L'art de bâtir chez les Romains*, Ducher, Paris 1873.
Choisy, 1909 = A. Choisy, *Vitruve*, 4 voll., Lahure, Paris 1909.
CIL = *Corpus Inscriptionum Latinarum*, G. Reimerum, Berolini.
Cozzo, 1928 = G. Cozzo, *Ingegneria Romana*, Mantegazza, Roma 1928.
Dio Cass. = Dio Cassius, *Historiae Romanae*.
Diod. = Diodorus Siculus, *Bibliotheca Historica*.
Esiodo = Hesiodus, *Scutum*.
Erodoto = Herodotus, *Historia*.
Favent. = Faventinus, *De Diversis Fabricis*.
Fiorelli, 1875 = G. Fiorelli, *Descrizione di Pompei*, Napoli 1875.
Frontino = I. Frontinus, *De Aquaeductu Urbis Romae*.
Frizot, 1975 = M. Frizot, *Mortiers et enduits peints antiques*, Centre de Recherche sur la tecnique greco-romaines, Université de Dijon, 1975.
Gallo Curcio, Iacobelli, 1986 = A. Gallo Curcio, F. Iacobelli, *La risposta della*

Colonna Traiana alla sollecitazione termo-elastica, in "L'industria delle costruzioni", 181, 1986, pp. 47 ss.
Garlan, 1974 = Y. Garlan, *Recherches de poliorcétique grecque*. Bib. Ec. Franc. Athènes et Rome, 223, Paris 1974.
Ginouvès et Martin, 1985 = R. Ginouvès, R. Martin, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, I, Materiaux et techniques de construction, technique et formes du décor*, Coll., Ec. Fr. de Rome et d'Athènes, 84, 1985.
Giovannoni, 1904 = G. Giovannoni, *L'architettura dei monasteri sublacensi*, Unione Coop. Editor., Roma 1904.
Giovannoni, 1925 = G. Giovannoni, *La tecnica della costruzione presso i Romani*, rist. anast. Bardi, 1969.
Giuliani, 1975 = C.F. Giuliani, *Volte e cupole a doppia calotta*, in "Roem. Mitt.", 82, 1975, pp. 329 ss.
Giuliani, 1988 = C.F. Giuliani, *Villa Adriana*, Autostrade, Roma 1988.
Giuliani, Verduchi, 1987 = C.F. Giuliani, P. Verduchi, *L'area centrale del Foro Romano*, Olschki, Firenze 1987.
H.A. = *Scriptores Historiae Augustae.*
Hopkins, 1978 = K. Hopkins, *Conquerors and Slaves*, The Cambridge University Press, Cambridge 1978.
Iuven. = D.I. Iuvenalis, *Saturae.*
Jacono, 1924 = L. Jacono, "Not. Scavi Acc. Lincei", 1924.
Kienast, 1983 = H.J. Kienast, *Planung und Ausfuerung des Tunnels des Eupalinos, Bauplanung und Bautheorie der Antike*, in "Diskuss. zur archaeol. Bauforschung", 4, D.A.I., 1983, pp. 104 ss.
Leger, 1875 = A. Leger, *Les Travaux publics aux temps des Romains*, J. Dejey, Paris 1875.
Liv. = T. Livius, *Ab Urbe condita.*
Lugli, 1933 = G. Lugli, *L'esame critico del monumento negli studi di Topografia Romana*, prolusione a.a. 1933, in "Historia", 8, 1934, pp. 388 ss.
Lugli, 1957 = G. Lugli, *La tecnica edilizia dei Romani*, Bardi, Roma 1957.
Maiuri, 1940 = A. Maiuri, *Le ultime fasi edilizie di Pompei*, Studi Romani, Roma 1940.
Mastrodicasa, 1981 = S. Mastrodicasa, *Dissesti statici nelle strutture edilizie*, 7ª ed., Hoepli, Milano 1981.
Mommsen, 1883 = Th. Mommsen, *Der Maximaltarif des Diokletian*, Berlin 1883.
Nonius = Nonius Marcellus, *De compendiosa doctrina.*
Olivier, Mefra, 1985 = A. Olivier, *Sommiers deplates-bandes appareilleés et armées à Conimbriga et à la villa d'Hadrien à Tivoli*, Mem. Ec. Franc., Rome 1985, pp. 937 ss.
Pauly-Wissowa = Paulys, *Real-Enzyklopaedie der klassischen Altertumswissenschaft Neue Bearbeitung begonnen von G. Wissowa.*
Petronio = Petronius Arbiter, *Satyricon.*
Platone, *Meno* = Plato, *Meno.*
Plin., *N.H.* = G. Plinius Secundus, *Naturalis Historia.*
Plinio il Giovane = Plinius Minor, *Epistularum libri IX; Epist. ad Traianum; Panegyricus Traiano Imperatore.*
Plut. = Plutarcus, *Vitae, Demetrius.*
Piccarreta = F. Piccarreta, *Alba Fucens: le cave dei fondatori* (in corso di pubblicazione).
Rivoira, 1921 = G.T. Rivoira, *Architettura romana. Costruzione e statica nell'età imperiale*, Hoepli, Milano 1921.

Salza, 1988 = E. Salza Prina Ricotti, *Villa Adriana. Un singolare solaio piano in opus caementicium*, in "Palladio", 1, giugno 1988, pp. 15 ss.
Sen., *Contr.* = L.A. Seneca Maior, *Controversiae*.
Sen., *Quaest. Nat.* = L.A. Seneca, *Quaestiones naturales*.
Sen., *De Benef.* = L.A. Seneca, *De Beneficiis*.
Skydsgaard, 1983 = J.E. Skydsgaard, *Public Building and Society in Ancient Rome, Città e Architettura nella Roma Imperiale*, Analecta Inst. Danici, suppl. X, 1983, pp. 223 ss.
Steinby, 1983 = *L'edilizia come industria pubblica e privata*, Analecta Inst. Danici, suppl. X, 1983, pp. 219 ss.
Strabone = Strabo, *Geographica*.
Suet. = C. Suetonius Tranquillus, *De Vita Caesarum*.
Van Deman, 1912 = E.B. Van Deman, *Methods of Determining the Date of Roman Concrete Monuments*, in "Amer. Journal of Archaeol.", II s., 16, 1912, 2, pp. 230 ss.
Tacito = C. Tacitus, *Annales*.
Teofrasto = Theophrastus, *De lapidibus*.
Tertulliano = Q.S.F. Tertullianus, *De Spectaculis*.
Tourtay, 1885 = S. Tourtay, *Annales de Pont et Chaussées*, 2 sem., pp. 230 ss.
Uggeri, 1802 = A. Uggeri, *Suppl. aux Journée pittoresques des Edifices de Roma Antique*, III, Pagliarini, Roma 1802.
Valerio Massimo = Valerius Maximus, *Factorum et dictorum memorabilium libri IX*.
Varro, *De L.L.* = Varro, *De Lingua Latina*.
Villard de Honnecourt, cfr. Bowie 1959.
Vitr. = Vitruvius, *De Architectura*.

Riferimenti bibliografici

Segue a titolo puramente indicativo un elenco di testi utili per un supporto generale al tema trattato. Si è preferito, per motivi di aderenza tematica e cronologica già esposti, una bibliografia tecnica datata ai primi decenni del secolo.

Manca, come è naturale per argomenti come questo, qualunque intenzione di completezza.

Per un lucido inquadramento storico della Scienza delle Costruzioni con relativa bibliografia si veda la voce "costruzioni" di E. Castiglia, in *Enc. Italiana*, 11, pp. 661 ss.

Per la muratura antica in generale oltre le opere di A. Choisy, G. Giovannoni, M.E. Blake, G.T. Rivoira, G. Lugli, J.P. Adam, citate nell'elenco delle abbreviazioni si vedano: J. Durm, *Die Baukunst des Etrusker und Roemer*, II, J. Ph. Diehl, Stuttgart 1905; A. Annichino, *La pozzolana e altri materiali flegrei da costruzione nell'antichità*, 1933; G. De Angelis d'Ossat, *La forma e la costruzione delle cupole nell'architettura romana*, in *Atti Conv. Naz. St. Arch.*, 3, 1938 (1940), pp. 233 ss.; L. Crema, *La volta nell'architettura romana*, in "L'ingegnere", 9, 1942, pp. 3 ss.; G. Giovannoni, *Tipi di volte romane*, in "Rivista di studi e vita romana", 9-12, 1943; L. Crema, *L'Architettura romana*, in "Enc. Class.", sez. III, XII, 1, SEI, Torino 1959; R. Martin, *Manuel d'Architecture Grecque I, Materiaux et techniques*, I, Picard, Paris 1965; A. Orlandos, *Les Matériaux de construction et la technique architecturale des ancients grecs*, I, E. De Boccard, Paris 1966; C. Fernandez Casado, *Ingenieria Hidraulica Romana*, Turner, Madrid 1985; J.J. Rasch, *Die Kuppel in der Roemischen Architektur*, in "Architectura", 2, 1985, pp. 117 ss.; R. Gnoli, *Marmora romana*, 2ª ed., L'Elefante, Roma 1988; F. Rakob, *Roemische Kuppelbauten in Baiae*, in "Roem. Mitt.", 95, 1988, pp. 257 ss.; P. Rockwell, *Lavorare la pietra*, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1989.

Informazioni di grande utilità per la conoscenza della muratura ordinaria si traggono oltre che dai già citati V. Baggi e S. Mastrodicasa anche dagli autori seguenti: J.V. Poncelet, *Essai sur l'art de tracer la menuiserie*, Liegi 1835; C. Ardent, *Etude théorique et experimentales sur l'établissement des charpentes à la grande portée*, Metz 1840; J. Krafft, *Traité de l'art de la charpente*, 2 voll., Paris 1844; E. Viollet-Le-Duc, *Dictionnaire raisonnée de l'Architecture Francaise du XI au XVI siècle*, A. Morel, Paris 1867; G. Curioni, *Costruzioni civili, stradali e idrauliche*, Negro A.F., Torino 1872; L. Marrocchi, *Trattato delle costruzioni in legno*, Milano 1879; F. Boubée, *Costruzioni in legno*, Napoli 1892; P. Planat, *L'art de bâtir*, Paris 1904-08; C. Formenti, *La pratica del fabbricare*, 2ª ed., Hoepli, Milano 1909; A.F. Jorini, *Teoria e pratica della costruzione dei ponti*, Hoepli, Milano 1917; C. Levi, *Trattato teorico-pratico di costruzioni civili, rurali, stradali e idrauliche*, Hoepli, Milano 1919; G.B. Milani, *L'ossatura murale*, Soc. Ital. Ediz. Art. Crudo, Torino 1920-23; C.I. Azimonti, *Considerazioni e*

dati teorico-pratici sui muri di sostegno, di sottoscarpa, di controripa, Roma 1917; J. Bied, *Recherches industrielles sur chaux, ciments et mortiers*, Paris 1926; R. Gruen, *Der Beton*, Berlin 1926; F. Anstett, *Essai et analyse des materiaux de construction et de travaux publics*, Paris 1927; G. Rizzi, *Il manuale del capomastro*, Hoepli, Milano 1927; G. Giovannoni, *Corso di Architettura*, Roma 1931; G. Astrua, *Il manuale completo del capomastro assistente edile*, 12, Hoepli, Milano 1968.